Элементы Радиоэлектронной Аппаратуры

В. Н. Гусев
В. Ф. Смирнов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

11

Советское радио

ЭЛЕМЕНТЫ

РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ

АППАРАТУРЫ

В. Н. Гусев,
В. Ф. Смирнов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

«СОВЕТСКОЕ РАДИО» МОСКВА 1968

УДК 621.319.4

Гусев В. Н., Смирнов В. Ф. **Электрические конденсаторы постоянной емкости.** М, «Советское радио», 1968 г., стр. 88, т. 36 000, ц. 23 коп.

В брошюре описываются физические процессы в конденсаторах при их эксплуатации, приводятся основные типы и характеристики выпускаемых промышленностью конденсаторов. Рассматриваются области применения конденсаторов в различных электрических режимах при одновременном воздействии климатических и механических факторов. Приводятся основные причины выхода конденсаторов из строя, а также меры по их предотвращению.

Особое внимание уделяется рассмотрению вопросов надежности и долговечности, объясняются основные соотношения, характеризующие надежность применительно к электрическим конденсаторам, приводятся зависимости надежности от режима нагрузки.

Брошюра содержит сведения о правилах эксплуатации конденсаторов, методах измерения основных параметров и проверки качества, порядке рекламирования конденсаторов, отказавших в процессе эксплуатации. Рассчитана на лиц, занимающихся ремонтом и эксплуатацией радиоэлектронной аппаратуры.

17 табл., 20 рис. и 14 назв. библ.

3-3-12
50-68

Редакционная коллегия серии брошюр ЭРА:

Балашов В. П. (отв. редактор), **Бацев В. И., Бергельсон И. Г., Девятков Н. Д., Девяткин И. И., Кондратенков В. М., Кузьмин Г. А., Кукарин С. В., Морозов И. И., Сретенский В. Н.** (зам. отв. редактора), **Темкин С. Е.** (зам. отв. редактора), **Тимофеев В. Ю., Якимов О. П., Яковлев В. Я.**

ВВЕДЕНИЕ

Конденсаторы являются одним из наиболее массовых видов радиоэлементов. Примерно четверть числа элементов любой радиоэлектронной аппаратуры (связи, телевидения, навигации и др.) приходится на их долю. Весьма разнообразна и область их применения. Вряд ли можно перечислить все функции, которые выполняют конденсаторы в различных устройствах. Это температурная компенсация параметров схем, задержка импульсов, фильтрация и блокировка переменных токов, создание мощных импульсов тока, связь между отдельными каскадами и многое другое. Конденсаторы являются также неотъемлемой частью колебательного контура. В связи с таким широким схемным применением потребность в конденсаторах все увеличивается.

Начальный период развития конденсаторостроения в нашей стране относится к двадцатым годам и характеризуется лабораторным мелкосерийным состоянием производства с использованием импортных материалов. В тридцатые годы широко проводятся научно-исследовательские работы по изучению свойств конденсаторов, совершенствованию их конструкций и технологии изготовления, замене импортных материалов отечественными. К началу Великой Отечественной войны в Советском Союзе выпускались уже все основные типы конденсаторов, необходимых для радиотехнической и электротехнической аппаратуры различного назначения. В период войны в восточных районах страны было в кратчайшие сроки налажено производство конденсаторов для военной радиоаппаратуры и организована разработка новых типов конденсаторов.

Особенно бурно развивается конденсаторостроение в последнее время. Созданы и расширяются специализированные заводы, все более механизируется и автоматизируется производство конденсаторов, намечается созда-

ние заводов-автоматов. Получают широкое развитие работы по изучению и повышению надежности конденсаторов, ведущая роль в проведении которых принадлежит И. И. Морозову. Значительно улучшилось и качество советских конденсаторов, благодаря чему они пользуются большим спросом на мировом рынке.

За короткий срок к 50-летию своего существования наша страна превратилась из импортера конденсаторов в одну из ведущих стран, экспортирующих конденсаторы высокого качества. Большая роль в развитии конденсаторостроения принадлежит советским ученым: Н. П. Богородицкому, Г. И. Сканави, В. Т. Ренне, Л. Н. Закгейму, М. М. Морозову, Б. М. Тареееву и многим другим.

Предъявляемые высокие требования к надежности современной радиоэлектронной аппаратуры выдвигают на первый план вопросы правильного выбора конденсаторов в зависимости от назначения, контроля их качества, технически обоснованной эксплуатации конденсаторов в условиях воздействия электрических, климатических и механических нагрузок.

Авторы настоящей брошюры поставили своей целью в краткой и доступной форме изложить читателю, занимающемуся разработкой, производством, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры, основные сведения о физических явлениях в конденсаторах, привести классификацию конденсаторов и их основные характеристики, дать рекомендации по выбору, эксплуатации и контролю качества конденсаторов, осветить вопросы их надежности и сохранности.

1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ КОНДЕНСАТОРОВ

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ. КЛАССИФИКАЦИЯ И НАЗНАЧЕНИЕ

Электрический конденсатор — это система из двух или более проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, предназначенная для создания электрической емкости между обкладками.

При подключении к обкладкам электрического напряжения в диэлектрике происходит процесс поляризации, заключающийся в ограниченном смещении зарядов или ориентации электрических диполей в электрическом поле. В зависимости от строения диэлектрика в поляризации могут участвовать электроны, ионы, диполи, ядра, отдельные области заряженных частиц (домены), полярные группы молекул. В реальных диэлектриках, как правило, всегда имеет место несколько разных видов поляризации, хотя преобладающим может быть один вид. Время установления поляризации диэлектрика зависит от вида поляризации и может быть от 10^{-15} *сек* (при электронной поляризации) до десятков минут (при междуслойной поляризации, наблюдающейся в неоднородных диэлектриках с накоплением зарядов на поверхности раздела).

Смещенные заряды в диэлектрике связывают часть зарядов на обкладках, поступающих от источника напряжения, в результате чего конденсатор накапливает потенциальную энергию — приобретает электрический заряд. Степень поляризации диэлектрика оценивается

Таблица 1

Краткие характеристики и сокращенные обозначения конденсаторов

Тип конденсатора по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Основные особенности	Основные области применения
Керамические на номинальные напряжения ниже 1 600 *в*	К10	Для высокочастотных конденсаторов: малые потери, большой выбор значений ТКЕ	Для высокочастотных конденсаторов: термокомпенсация, емкостная связь, фиксированная настройка контуров на высокой частоте
		Для низкочастотных: большая удельная емкость, резкая зависимость емкости от температуры	Для низкочастотных конденсаторов: шунтирующие, блокирующие и фильтровые цепи, связь между каскадами на низкой частоте
Керамические на номинальные напряжения 1 600 *в* и выше	К15	Относительно большие реактивные мощности, большой выбор значений ТКЕ	Емкостная связь, фиксированная настройка мощных высокочастотных контуров, импульсная техника
Стеклянные Стеклокерамические Стеклоэмалевые	К21 К22 К23	Малые потери, высокая стабильность емкости во времени для высокочастотных конденсаторов	Блокировка, фиксированная настройка высокочастотных контуров, емкостная связь, шунтирующие цепи
Слюдяные малой мощности Слюдяные большой мощности	К31 К32	Малые потери, низкая удельная емкость, малое изменение емкости от температуры и во времени	Блокировочные и шунтирующие, высокочастотные фильтровые цепи, емкостная связь, фиксированная настройка контуров, в цепях линий задержки
Бумажные на номинальные напряжения ниже 1 600 *в* с фольговыми обкладками	К40	Относительно малые потери, высокая удельная емкость, значительная индуктивность	Блокировочные, буферные, шунтирующие, фильтровые цепи, емкостная связь

Бумажные на номинальное напряжение 1 600 *в* и выше с фольговыми обкладками	К41		
Бумажные с металлизированными обкладками (металлобумажные)	К42	Большая, чем у бумажных, удельная емкость, способность самовосстанавливаться при пробое	Цепи развязок и фильтры; для емкостной связи не применяются
Электролитические алюминиевые	К50	Очень большая удельная емкость, большие потери, значительные токи утечки	Шунтирующие и фильтровые цепи, накопление энергии в импульсных устройствах
Электролитические танталовые фольговые	К51	По сравнению с электролитическими алюминиевыми: бóльшая удельная емкость, меньшие потери и токи утечки, увеличенный срок хранения, более широкий интервал рабочих температур, лучшие температурно-частотные характеристики	Применяются в тех же цепях, что и электролитические алюминиевые, в основном, в транзисторной аппаратуре с повышенными требованиями к параметрам конденсаторов
Электролитические танталовые объемнопористые	К52		
Оксиднополупроводниковые	К53		
Воздушные	К60	Очень малые потери, очень малая удельная емкость, очень малое изменение емкости во времени	Образцовые эталоны емкости, высоковольтные блокировочные, развязывающие, контурные конденсаторы
Вакуумные	К61		
Полистирольные с фольговыми обкладками	К70	Очень высокое сопротивление изоляции, низкая абсорбция	Точные временные цепи, интегрирующие устройства, настроенные контуры высокой добротности, образцовые емкости
Полистирольные с металлизированными обкладками	К71		

Продолжение табл. 1

Тип конденсатора по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Основные особенности	Основные области применения
Фторопластовые (ФТ)	К72	Высокая рабочая температура (до 200° С), очень высокое сопротивление изоляции, низкая абсорбция, очень малые потери и малое изменение емкости от температуры	В тех же цепях, что и полистирольные, при повышенных температурах и жестких требованиях к электрическим параметрам, в дозиметрических устройствах
Полиэтилентерефталатные с металлизированными обкладками	К73	Малая абсорбция, электрические характеристики несколько лучше, чем у бумажных конденсаторов	В тех же цепях, что и бумажные конденсаторы, при повышенных требованиях к электрическим параметрам
Полиэтилентерефталатные с фольговыми обкладками	К74		
Комбинированные	К75	Повышенная электрическая прочность и высокая надежность	В тех же цепях, что и бумажные конденсаторы при повышенных требованиях к надежности
Лакопленочные	К76	Высокая удельная емкость (выше, чем у металлобумажных конденсаторов), малые габаритные размеры, ток утечки меньше, чем у электролитических конденсаторов	Частично могут заменять электролитические конденсаторы (особенно при повышенных значениях переменной составляющей). Применяются в тех же цепях, что и бумажные и электролитические конденсаторы

величиной его диэлектрической проницаемости ε, показывающей, во сколько раз уменьшится емкость конденсатора, если данный диэлектрик между пластинами заменить вакуумом. Чем больше ε материала, тем меньший объем будет иметь изготовленный из него конденсатор при постоянном значении емкости и толщины диэлектрика.

При включении конденсатора в цепь постоянного тока после окончания заряда ток через конденсатор спадает до весьма малой величины, и, практически, конденсатор не пропускает постоянного тока. При включении конденсатора в цепь переменного тока процессы заряда и разряда чередуются, обусловливая протекание тока через конденсатор с сопротивлением переменному току *

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \ [ом], \qquad (1)$$

где f — частота, *гц*; C — емкость, *ф*.

Эти свойства конденсатора и определяют в основном область его применения. Реже используются зависимости емкости от температуры (в схемах термокомпенсации), от напряжения (при использовании конденсатора в качестве управляемого элемента) и некоторые другие.

В конденсаторостроении применяется большое количество диэлектриков с различными механизмами поляризации, диэлектрическая проницаемость которых имеет значение от единицы до десятков тысяч.

В зависимости от вида диэлектрика производится классификация конденсаторов и их сокращенное обозначение (для разрабатываемых и модернизируемых с 1961 г.). Сокращенное обозначение составляется из условного индекса конденсатора постоянной емкости *(К)*, условного обозначения диэлектрика (двузначного числа) и порядкового номера исполнения конденсатора, который отделяется от остальных индексов черточкой. Каждому виду конденсаторов (по диэлектрику) присуща своя наиболее употребительная область, в пределах которой его применение является наиболее целесообразным.

---

* При использовании конденсатора на высокой частоте необходимо учитывать наличие собственной индуктивности (см. § 9).

В табл. 1 приведена классификация конденсаторов по виду диэлектрика, их условные обозначения, отличительные характеристики и наиболее рациональные области применения.

Пример обозначения. Конденсатор керамический, на напряжение ниже 1600 *в,* седьмая разработка, обозначается К10-7.

Для характеристики электрических и эксплуатационных свойств конденсаторов используется ряд параметров, которые приводятся в технических условиях, стандартах, справочниках и дополнениях к ТУ.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. НОМИНАЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ. ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ЕМКОСТИ ОТ НОМИНАЛЬНОЙ

Электрическая емкость конденсатора — способность конденсатора накапливать на обкладках электрические заряды под воздействием электрического поля. Выражается она отношением

$$C = \frac{Q}{U}, \qquad (2)$$

где C — емкость, *ф*; Q — электрический заряд, *к*; U — приложенное к обкладкам напряжение, *в*.

Обычно для оценки емкости используются меньшие единицы: микрофарада *(мкф),* нанофарада *(нф),* пикофарада *(пф*; неправильное название ее — микромикрофарада — *мкмкф),* между которыми существует следующее соотношение:

$$1\,ф = 10^6\,мкф = 10^9\,нф = 10^{12}\,пф.$$

Значение емкости, отмаркированное на конденсаторах или указанное в сопроводительной документации, носит название номинальной емкости; истинное значение емкости конденсатора может отличаться от номинального не более чем на допускаемое отклонение, которое также маркируется на конденсаторе или оговаривается технической документацией. Наряду с известными полными обозначениями номинальной емкости и допускаемого отклонения для малогабаритных конденсаторов и малоформатных схем начинают применять сокращенные

обозначения (в соответствии с ГОСТ 11076—64). Они состоят из слитно расположенных: цифры, указывающей номинальную величину емкости, буквы, обозначающей единицу измерения емкости и одновременно указывающей положение запятой десятичной дроби, и буквы, обозначающей допускаемое отклонение емкости от номинальной.

Порядок обозначения номинальных емкостей приведен в табл. 2, допускаемых отклонений — в табл. 3.

Таблица 2

Полные и сокращенные обозначения номинальной емкости

Единица измерения	Полное обозначение			Сокращенное обозначение		
	Обозначение единицы измерения	Пределы номинальных емкостей по ГОСТ 2519-60	Примеры обозначения	Обозначение единиц измерения	Пределы номинальных емкостей	Примеры обозначения
Пикофарада	*пф*	До 9100	1,5 *пф* 15 *пф* 150 *пф*	П	До 91	1П5 15П
Нанофарада	*нф*		1500 *пф* 0,015 *мкф*	Н	От 0,1 до 91	Н15 1Н5 15Н
Микрофарада	*мкф*	от 0,010 и выше	0,15 *мкф* 1,5 *мкф* 15 *мкф* 100 *мкф*	М	От 0,1 и выше	М15 1М5 15М 100М

Номинальные емкости конденсаторов (кроме электролитических), в зависимости от допускаемого отклонения, соответствуют значениям, приведенным в табл. 4. Величины номинальных емкостей электролитических конденсаторов должны соответствовать ряду 1—2—5—10—20—50—100—200—500—1000—2000—5000 *мкф*.

Пример кодированного обозначения. Конденсатор керамический на напряжение до 1600 *в*, седьмой разработки, емкостью 1500 *пф* с допускаемым отклонением $^{+800}_{-20}$% обозначается К10-7-1Н5А

Приведенные величины не распространяются на конденсаторы специальные: вакуумные, для повышения коэффициента мощности и др. Указанными рядами можно пользоваться для выбора конденсаторов, если

Таблица 3

Полные и кодированные обозначения допускаемого отклонения емкости от номинальной

Допускаемое отклонение емкости, %	±0,1	±0,2	±0,5	±1	±2	±5	±10	±20
Кодированное обозначение	Ж	У	Д	$Р_ф$	Л	И	С	В
Допускаемое отклонение емкости, %	+30	+50 −10	+50 −20	+80 −20	+100	+100 −10	±0,4 *пф*	
Кодированное обозначение	Ф	Э	Б	А	Я	Ю	Х	

в ТУ на конденсаторы указаны только пределы номинальных емкостей и допускаемое отклонение.

Величина допускаемого отклонения емкости от номинальной не является характеристикой, определяющей качество конденсатора (как, например, стабильность параметров, надежность); при выборе конденсаторов с тем или иным допуском необходимо учитывать только зависимость выходных параметров устройства от возможного отклонения емкости.

Пример. Определить номинальную емкость и допускаемое ее отклонение от номинальной емкости конденсатора, предназначенного для работы в параллельном колебательном контуре на частоте $f_0 = 400 \pm 10$ *кгц* с индуктивностью $L = 0{,}8$ *мгн*. Для упрощения расчета не будем учитывать возможные отклонения от номинала индуктивности и изменения емкости и индуктивности в рабочем интервале температур.

Номинальное значение емкости определится из условия резонанса на частоте f_0:

$$C_{ном} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} = 200\ пф.$$

Нижнее значение емкости, определяющее верхнюю допустимую границу частоты колебательного контура

$$f_{верхн} = 400 + 10 = 410\ кгц,$$

Таблица 4

Величины номинальных емкостей (по ГОСТ 2519-60) в зависимости от допускаемых отклонений

±20% и более	±10%	±5%	±20% и более	±10%	±5%	±20% и более	±10%	±5%	±20% и более	±10%	±5%	±20% и более	±10% ±5%	±5%, ±10%, ±20% и более		
пф												*мкф*				
1,0	1,0	1,0	10	10	10	100	100	100	1000	1000	1000	0,01	0,01	0,1	1,0	10
		1,1			11			110			1100					
	1,2	1,2		12	12		120	120		1200	1200		0,012			
		1,3			13			130			1300					
1,5	1,5	1,5	15	15	15	150	150	150	1500	1500	1500	0,015	0,015	0,15	1,5	15
		1,6			16			160			1600					
	1,8	1,8		18	18		180	180		1800	1800		0,018			
		2,0			20			200			2000					
2,2	2,2	2,2	22	22	22	220	220	220	2200	2200	2200	0,022	0,022	0,22	2,2	22
		2,4			24			240			2400					
	2,7	2,7		27	27		270	270		2700	2700		0,027			
		3,0			30			300			3000					
3,3	3,3	3,3	33	33	33	330	330	330	3300	3300	3300	0,033	0,033	0,33	3,3	33
		3,6			36			360			3600					
	3,9	3,9		39	39		390	390		3900	3900		0,039			
		4,3			43			430			4300					
4,7	4,7	4,7	47	47	47	470	470	470	4700	4700	4700	0,047	0,047	0,47	4,7	47
		5,1			51			510			5100					
	5,6	5,6		56	56		560	560		5600	5600		0,056			
		6,2			62			620			6200					
6,8	6,8	6,8	68	68	68	680	680	680	6800	6800	6800	0,068	0,068	0,68	6,8	68
		7,5			75			750			7500					
	8,2	8,2		82	82		820	820		8200	8200		0,082			
		9,1			91			910			9100					100

должно быть равным

$$C_{\text{нижн}} = \frac{1}{4\pi^2 f^2_{\text{верхн}} L} = 190\,пф.$$

Верхнее значение емкости, определяющее нижнюю допустимую границу частоты колебательного контура (390 *кгц*),

$$C_{\text{верхн}} = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{нижн}} L} = 210\,пф.$$

Таким образом, для колебательного контура требуется конденсатор емкостью

$$C = 200\,пф \pm 5\%.$$

Пример. Определить номинальную емкость и допустимое отклонение ее от номинальной емкости разделительного конденсатора для резонансного усилителя высокой частоты при условии, что

$$C \geqslant \frac{10^3}{f_{\text{мин}}}; \quad f_{\text{мин}} = 5\,Мгц.$$

Подставляя значение $f_{\text{мин}}$ в формулу, находим, что емкость конденсатора должна быть более 200 *пф*. Следовательно, в этом случае можно выбрать конденсатор практически с любым значением допускаемого отклонения емкости от номинальной, например, $270 \pm 20\%$.

Приведенные примеры являются упрощенными и служат лишь иллюстрацией к вопросу о выборе допускаемых отклонений емкости от номинальной.

На практике при проектировании радиоаппаратуры обычно выбирают радиоэлементы, к которым наиболее чувствительны выходные параметры аппаратуры, определяют приращения выходных параметров как функции приращения параметров элементов и при помощи функционального (иногда вероятностного) анализа с учетом заданных граничных условий рассчитывают допустимые отклонения параметров от номинала.

3. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЕМКОСТИ. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЕМКОСТИ

Величина емкости конденсатора зависит от его температуры вследствие зависимости диэлектрической проницаемости от температуры, линейного расширения металла обкладок и линейного расширения диэлектрика. Зависимость емкости от температуры, как правило, отличается от линейной и нередко принимает довольно сложный вид. Однако для некоторых типов конденсаторов (высокочастотных керамических, слюдяных воздушных, полистирольных и др.) она приближается к линейной. Для оценки изменения емкости таких конденсаторов от температуры служит температурный коэффициент емкости (ТКЕ), показывающий насколько изменяется емкость при увеличении температуры на 1° С.

$$ТКЕ = \frac{C_2 - C_1}{C_1 (t_2 - t_1)},\ град^{-1}, \qquad (3)$$

где C_1 — емкость при температуре t_1 (обычно $25 \pm 10°$ С); C_2 — емкость при температуре t_2 (обычно предельной верхней или нижней).

ТКЕ чаще всего выражают в миллионных долях изменения емкости, отнесенных к градусу Цельсия ($10^{-6}\ град^{-1}$). Температурный коэффициент емкости может быть положительным, отрицательным или близким к нулю.

Для обозначения температурного коэффициента емкости используются условные обозначения в виде букв, обозначающих знак ТКЕ (М — минус, П — плюс, МП — близкое к нулю) и цифр, указывающих значение ТКЕ в миллионных долях, а также цветная кодировка. Раньше области значений ТКЕ обозначались отдельными буквами (например, П, С, Р и т. д.); эти обозначения для некоторых типов конденсаторов применяются и в настоящее время.

В табл. 5 приведены значения ТКЕ для некоторых типов конденсаторов и их условные обозначения. Зная ТКЕ, легко оценить ожидаемое изменение емкости при изменении температуры, используя выражение (3).

Пример. Определить возможное изменение емкости конденсатора КТ-1 М700 с номинальной емкостью

Таблица 5

Значения температурных коэффициентов емкости и их условные обозначения

Вид конденсатора	Тип конденсатора	Значение ТКЕ на $1°C \cdot 10^6$	Диапазон температур для ТКЕ, °С	Условное обозначение ТКЕ		
				буквами и цифрами	цветным кодом	
					цвет покрытия конденсатора	цвет маркировочной точки
Керамические		$+(120\pm30)$		П120	Синий	Без точки
		$+(100\pm30)$		П100	„	Черный
		$+(33\pm30)$		П33	Серый	Без точки
		0 ± 30		МП0	Голубой	Черный
		$-(33\pm30)$		М33	„	Коричневый
		$-(47\pm30)$	От 20	М47	„	Без точки
		$-(75\pm30)$	до 70	М75	„	Красный
		$-(150\pm40)$		М150	Красный	Оранжевый
		$-(220\pm40)$		М220	„	Желтый
		$-(330\pm100)$		М330	„	Зеленый
		$-(470\pm100)$		М470	„	Синий
		$-(750\pm100)$		М750	„	Без точки
		$-(700\pm100)$		(М700)	—	—
		$-(1500\pm200)$		М1500	Зеленый	Без точки
		$-(1300\pm200)$		(М1300)	—	—
		$-\left(2200^{+500}_{-300}\right)$		М2200	Зеленый	Желтый

Продолжение табл. 5

Вид конденсатора	Тип конденсатора	Значение ТКЕ на 1°С·10⁶ в диапазоне температур	Диапазон температур для ТКЕ, °С	Условное обозначение ТКЕ		
				буквами и цифрами	цветным кодом	
					цвет покрытия конденсатора	цвет маркировочной точки
Стеклокерамические	СКМ-Т	±50	От 20 до 200	Г		
		—(350±160)		Д		
	СКМ, К22У-1	0±30	От 30 до 70	МП0		Серый
		—(47±30)		М47		Голубой
		—(330±100)		М330		Красный
Стеклоэмалевые	СКС-1	0±30	От 20 до 100	0		
		—(65±30)		М		
		+(70±35)		Р		
		+(150±30)		П		
	ДС	⩽±50	От —60 до +100	—		
Слюдяные	—	⩽±200	Во всем рабочем диапазоне	Б		
		⩽±100		В		
		⩽±50		Г		
Металлопленочные	МПГТ	⩽—200	От 20 до 60			
	МПО, МПГО	⩽—150	От 20 до 60			
Пленочные	ФЧ	⩽550	От —60 до +155			
	К72П-6	⩽—200	От —60 до +200			
	ПМ	⩽—200	От 20 до 70			
	ФТ	+50÷—200	От —60 до 200			
	ФД	⩽±300	От 20 до 60			

$C_{ном} = 100$ *пф* при изменении температуры от 25 до 85° С, ТКЕ $= -(700 \pm 100) \cdot 10^{-6}$, *град*$^{-1}$.

При ТКЕ $= -600 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$

$$\frac{\Delta C}{C_{ном}} = -600 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = -0{,}036 = -3{,}6\%;$$

$$\Delta C = -3{,}6 \text{ пф}.$$

При ТКЕ $= -800 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$

$$\frac{\Delta C}{C_{ном}} = -800 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = -0{,}048 = -4{,}8\%;$$

$$\Delta C = -4{,}8 \text{ пф}.$$

Таким образом, изменение емкости будет лежать в пределах $-(3{,}6 \div 4{,}8)\%$ или от $-3{,}6$ до $-4{,}8$ *пф*.

Для конденсаторов с явно выраженной нелинейной зависимостью емкости от температуры (например, сегнетокерамических), а также для конденсаторов, точные

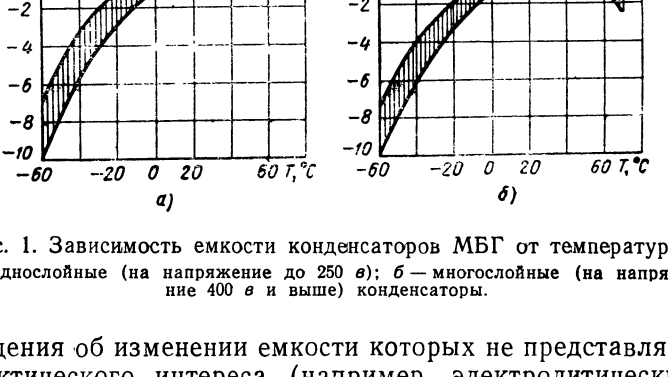

Рис. 1. Зависимость емкости конденсаторов МБГ от температуры: *а* — однослойные (на напряжение до 250 *в*); *б* — многослойные (на напряжение 400 *в* и выше) конденсаторы.

сведения об изменении емкости которых не представляют практического интереса (например, электролитических, бумажных), обычно приводят относительное изменение емкости в интервале рабочих температур.

Так, например: для керамических конденсаторов группы Н70 (буква Н означает, что ТКЕ не нормируется) изменение емкости в интервале допустимых температур ($-60 \div +85$° С) не должно превышать -70% относительно емкости, измеренной при $+20$° С (положительное изменение емкости не регламентируется); для бумажных

конденсаторов КБГ допускается изменение емкости до ±10% относительно емкости, измеренной при температуре +20° С, при изменении температуры от —40 до +70° С; для электролитических конденсаторов К53-1А изменение емкости при температуре +125° С не должно

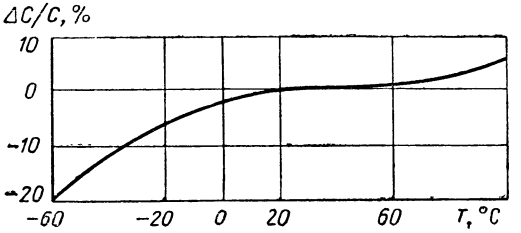

Рис. 2. Зависимость емкости конденсаторов ЭТО от температуры.

превышать +15%, а при температуре —80° С не должно превышать —15% относительно емкости, измеренной при +20° С.

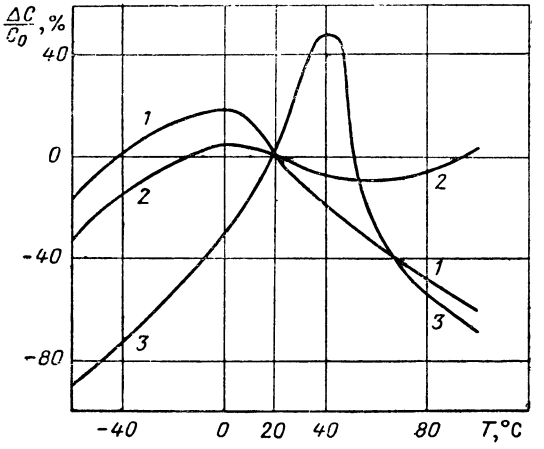

Рис. 3. Зависимость емкости керамических низкочастотных конденсаторов от температуры:
1 — Н70; *2* — Н30; *3* — Н90; (C_0 — емкость, измеренная при 20°).

На рис. 1—3 приведены температурные зависимости изменения емкости для некоторых типов конденсаторов.

Из приведенных примеров видно, что изменение емко-

сти от температуры для отдельных типов конденсаторов может достигать существенной величины, которую необходимо в отдельных случаях учитывать при конструировании и анализе работы электронной аппаратуры.

4. СТАБИЛЬНОСТЬ ЕМКОСТИ

Под стабильностью емкости здесь понимается отсутствие скачкообразных изменений емкости, вызываемых эффектом «мерцания». Этот эффект практически может проявляться у всех конденсаторов с электродами в виде металлического слоя, нанесенного на диэлектрик, и отсутствует у конденсаторов со сплошными электродами из фольги. При металлизации конденсаторов у краев электродов обычно образуются изолированные островки металла. Под воздействием внешних факторов эти островки могут на некоторое время подключаться к основному электроду, увеличивая общую емкость конденсатора. Исследование мерцающих конденсаторов показало, что при воздействии переменного электрического напряжения между основным электродом и островками может образовываться электрическая микродуга, поддерживаемая емкостным током. Наряду с увеличением емкости конденсатора из-за расхода энергии на образование дуги «мерцание» сопровождается дополнительными потерями в конденсаторе. Интенсивность мерцания увеличивается с увеличением приложенного к конденсатору напряжения. Увеличение температуры окружающей среды также приводит к увеличению интенсивности мерцания.

Площадь подключенных островков обычно значительно меньше площади основного электрода, и относительное изменение емкости сравнительно мало. Поэтому «мерцание» емкости может в какой-то степени сказаться только при использовании конденсаторов в контурах высокой стабильности и добротности или во временных цепочках высокой точности. Наиболее часто для таких цепей применяют керамические и слюдяные конденсаторы. Проведенные исследования этих конденсаторов показали, что в зависимости от типа конденсатора, его емкости и приложенного напряжения относительное изменение емкости при наличии «мерцания» составляет от $\pm 0{,}0001$ до $\pm 0{,}05\%$. Эти изменения емкости обычно

носят хаотический характер и вызывают повышение уровня шумов.

В ряде случаев эффект «мерцания» может вызвать изменение частоты гетеродина и паразитную амплитудную модуляцию генераторов. Так, например, анализ работы схемы одного из промышленных телеграфных приемников с шириной полосы пропускания 300 *гц*, настройкой приемника на частоту корреспондента не точнее ±50 *гц* показывает, что уход емкости контура гетеродина на ±0,007% при частоте 2,5 *кгц* вызывает уход частоты гетеродина на ±100 *гц*, что может вызвать уход входного сигнала за полосу пропускания приемного тракта. Обычно мерцание конденсаторов в контурах приемной радиоаппаратуры вызывает эффект, внешне похожий на замирание радиосигнала при работе на коротких волнах отраженным лучом.

Однако для большинства случаев использования конденсаторов малые уходы емкости, вызванные эффектом мерцания, практически не могут заметно ухудшить выходные параметры радиоаппаратуры. Поэтому требования к стабильности емкости конденсаторов следует предъявлять только с учетом чувствительности выходных параметров аппаратуры к малым уходам емкости относительно ее первоначальной величины.

5. АБСОРБЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В КОНДЕНСАТОРЕ

Если обкладки конденсатора на малое время замкнуть «накоротко», а затем разомкнуть, то напряжение на его обкладках сначала упадет до нуля, а после размыкания может опять увеличиться до некоторого значения. Это явление, свойственное конденсаторам с замедленной поляризацией (многослойным, с неоднородностями диэлектрика), называется абсорбцией электрических зарядов.

Явление абсорбции в первом приближении можно объяснить, пользуясь эквивалентной схемой, изображенной на рис. 4. При замыкании накоротко на малое время выводов *1—2* обкладок успевает полностью разрядиться только основная емкость, обусловленная быстрой поляризацией. Однако в диэлектрике (особенно в неоднородном) на поверхностях раздела, на неоднородностях

и в некоторых других случаях накапливаются объемные заряды, на образование которых затрачивается значительное время, измеряемое иногда десятками минут. Наличие таких зарядов на рис. 4 изображено в виде некоторой абсорбционной емкости C_a, подключенной к основной через эквивалентное сопротивление R_a.

Емкость C_a за время закорачивания обкладок конденсатора не успевает разрядиться полностью, и после

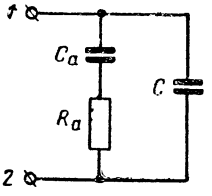

Рис. 4. Эквивалентная схема, объясняющая абсорбцию в конденсаторах: C — основная емкость; C_a — абсорбционная емкость; R_a — эквивалентное сопротивление абсорбции.

их размыкания оставшийся заряд распределяется между C_a и C, создавая на выводах *1—2* некоторое напряжение.

Величину абсорбции количественно характеризуют коэффициентом абсорбции

$$K_a = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%, \qquad (4)$$

где U_1 — напряжение на обкладках конденсатора до закорачивания; U_2 — напряжение, восстановившееся на обкладках конденсатора через 3 *мин* после того как он был закорочен на 5 *сек*.

Таким образом, коэффициент абсорбции показывает, какая часть общего заряда, запасенного диэлектриком при его поляризации, отдается в процессе восстановления напряжения.

Явление абсорбции необходимо учитывать при работе с высоковольтными конденсаторами, на которых после их кратковременного разряда может восстановиться опасное для жизни напряжение. Проявление абсорбции в конденсаторах может вызвать нарушение нормальной работы некоторых схем (реле времени, интегральных цепочек и др.)

В табл. 6 приведены значения коэффициентов абсорбции для некоторых типов конденсаторов при температу-

Таблица 6

Значения коэффициента абсорбции для некоторых типов конденсаторов

Тип диэлектрика	Тип конденсатора	Коэффициент абсорбции, %
Полистирольная пленка	ПСО, ПО, ПМ, МПГ, МПГО и др.	0,03—0,1
Пленка фторопласт-4	ФТ, К72П-6, ФГТИ	0,01—0,1
Полиэтилентерефталатная пленка	ПМГЦ, ПМГП, К73П-2	0,2—0,8
Бумага, пропитанная вазелином	КБГ, БГТ, К40П-2, БГМ	0,6—1
Металлобумажные конденсаторы, пропитанные церезином	МБГ, МБГО, МБГИ, МБГТ, МБМ и др.	2—5
Слюда	КСО, КСОТ, КСГ, СГМ и др.	2—5
Окись тантала	К52-1, ЭТО, К53-1	0,6—2

ре +20° С, на рис. 5 — зависимость коэффициента абсорбции от температуры (в логарифмическом масштабе).

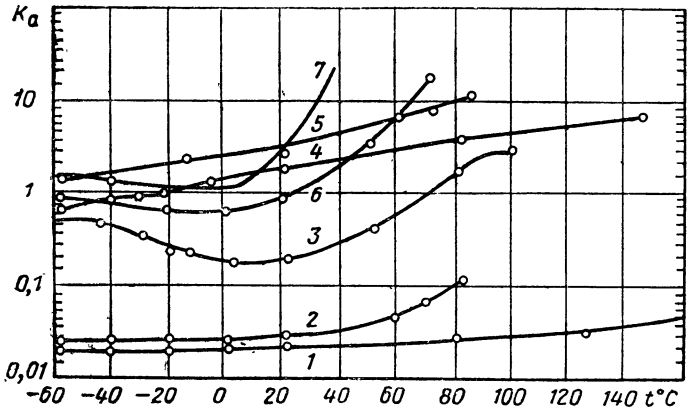

Рис. 5. Зависимость коэффициента абсорбции от температуры: *1* — конденсатор с диэлектриком из фторопласта-4; *2* — конденсатор с диэлектриком из полистирола; *3* — конденсатор с диэлектриком из полиэтилентерефталата; *4* — объемнопористый танталовый электролитический конденсатор; *5* — слюдяной конденсатор; *6* — бумажный конденсатор, пропитанный вазелином; *7* — металлобумажный конденсатор, пропитанный церезином.

6. ТАНГЕНС УГЛА ПОТЕРЬ

При подключении к конденсатору источника электрической энергии часть ее теряется в виде тепла (из-за сквозной проводимости, расхода энергии на смещение зарядов при поляризации, потерь энергии в выводах и электродах, потерь на ионизацию воздушных включений в диэлектрике и др.). Если сравнить процесс накопления

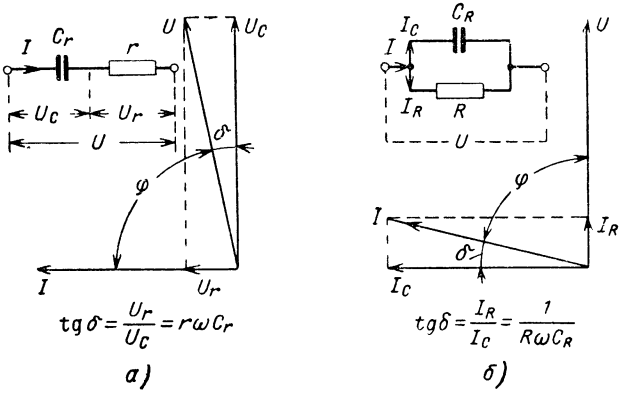

Рис. 6. Эквивалентные последовательная (*а*) и параллельная (*б*) схема конденсатора с потерями:

r и *R* — сопротивления, эквивалентные потерям в конденсаторе, *ом*; C_r и C_R — эквивалентные емкости, *ф*; *U* — напряжение частоты ω; *I* — ток через конденсатор.

заряда конденсатора с накоплением потенциальной энергии механической пружиной при ее сжатии, то потери энергии в конденсаторе следует сравнить с потерями энергии в пружине, выделяющимися также в виде тепла.

Величина потерь в конденсаторе оценивается тангенсом угла потерь δ, дополняющего до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи (рис. 6). Тангенс угла потерь можно выразить и как отношение активной мощности потерь конденсатора к его реактивной мощности при синусоидальном напряжении (подробнее см. § 10). Потери в конденсаторе в первую очередь определяются структурой его диэлектрика и наличием различных дефектов (инородных включений, повышенной проводимости и др.). Наименьшие потери имеют вакуумные конденсаторы ($tg\,\delta \leqslant 10^{-5}$), наиболь-

шие — алюминиевые электролитические ($\operatorname{tg}\delta = 0{,}1 \div 0{,}3$).

В некоторых случаях определяющим в величине $\operatorname{tg}\delta$ является сопротивление металлических частей конденсатора, особенно на высоких частотах из-за вытеснения тока к поверхности проводника, а для электролитических конденсаторов — сопротивление электролита. Иногда

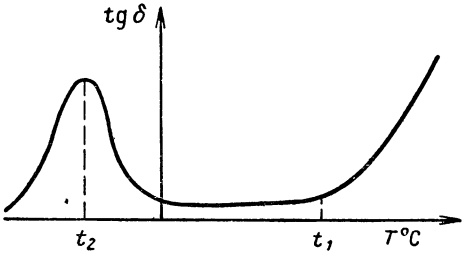

Рис. 7. Характер зависимости тангенса угла потерь конденсатора от температуры.

для оценки потерь в конденсаторе пользуются величиной, обратной $\operatorname{tg}\delta$, называемой добротностью

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta}, \tag{5}$$

или коэффициентом мощности конденсатора

$$\cos\varphi = \frac{\operatorname{tg}\delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}}. \tag{6}$$

Величина $\operatorname{tg}\delta$ зависит от температуры, частоты и приложенного напряжения. Характер температурной зависимости определяется зависимостью угла потерь диэлектрика конденсатора, так как потери в металлических частях относительно мало зависят от температуры.

На рис. 7 приведен общий вид зависимости тангенса угла потерь конденсатора от температуры. Максимум при температуре t_2 объясняется дипольными потерями и имеет место только у конденсаторов с полярным диэлектриком; увеличение $\operatorname{tg}\delta$ при температурах выше t_1 объясняется увеличением потерь с ростом ионной проводимости и характерно для всех типов конденсаторов.

На рис. 8 приведен общий вид зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от частоты. Составляющая тангенса угла потерь конденсатора $\operatorname{tg}\delta_д$, вызванная потерями в диэлектрике, обычно с увеличением частоты уменьшается, хотя для отдельных типов конденсаторов в некотором диапазоне частот может наблюдаться максимум потерь. С уменьшением ча-

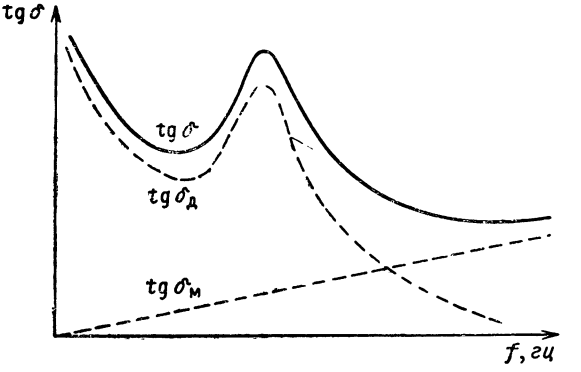

Рис. 8. Характер зависимости угла потерь конденсатора от частоты.

стоты потери возрастают; это объясняется наличием повышенной проводимости

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1{,}8 \cdot 10^{12}\gamma}{\varepsilon f}, \qquad (7)$$

где γ — проводимость; ε — диэлектрическая проницаемость; f — частота.

Уменьшение глубины проникновения тока в металл с увеличением частоты вызывает увеличение плотности тока в близких к поверхности слоях проводника и соответственно увеличение составляющей тангенса угла потерь конденсатора $\operatorname{tg}\delta_м$, вызванной потерями в металлических частях.

Таким образом, частотный ход тангенса угла суммарных потерь $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_д + \operatorname{tg}\delta_м$ может иметь довольно сложный вид. В технических условиях на конденсаторы значение $\operatorname{tg}\delta$ обычно приводят с обязательным указанием температуры, частоты и напряжения, при которых производят измерения, а иногда приводят также частотные и температурные зависимости $\operatorname{tg}\delta$.

В табл. 7 приведены значения $\operatorname{tg}\delta$ для некоторых типов конденсаторов.

Таблица 7

Максимально допустимые по ТУ значения тангенса угла потерь для некоторых типов конденсаторов

Тип конденсатора	Максимальная температура $t_{макс}$, °С	Частота измерения, *гц*	Значения tg δ	
			при 20° С	при $t_{макс}$
Керамический высокочастотный	85—155	10^6	0,001—0,0015	0,0015—0,0025
Керамический низкочастотный	85	10^3	0,01—0,035	0,02—0,07
Комбинированный К75-10	100	50	0,008	0,02
Комбинированный К75-12	100	10^3	0,01	0,02
Фторопластовый ФЧ	155	10^3	0,0005	0,001
Фторопластовый К72П-6	200	10^3	0,001	0,0015
Слюдяной КСО	70	10^6	0,001—0,002	0,002—0,004
Стеклоэмалевый	85	10^6	0,0015	0,0018
Полистирольный	60	10^6	0,001	0,0015
Бумажный КБГ	70	$50—10^3$	0,01	—
Металлобумажный К42У-6	35	50	0,008	—
Металлобумажный МБГ	70	$50—10^3$	0,015	—
Электролитический алюминиевый				
ЭМ $U_{ном} \geqslant 150$ *в*	60	50	0,1	—
ЭМ $U_{ном} < 150$ *в*	60	50	0,15	—
Электролитический танталовый объемнопористый К52-1А	85	50	0,15	—
Электролитический танталовый объемнопористый К52-2А	200	50	0,3	—
Оксиднополупроводниковый К53-7	85	50	0,06	—
Оксиднополупроводниковый К53-1А, К53-6А	125	50	0,08	—
Оксиднополупроводниковый К53-4	85	50	0,2	—
Лакопленочный К76П-1	70	10^3	0,01	0,02
Лакопленочный К76-2	85	10^3	0,01	0,02

7. СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ. ТОК УТЕЧКИ

После окончания процесса заряда конденсатора проходящий через него ток принимает некоторое конечное значение, называемое током утечки. Величина тока утечки обусловлена наличием в диэлектрике свободных ионов (реже электронов), полупроводящих включений, а также проводимостью участка поверхности конденсатора между выводами.

Отношение величины приложенного к конденсатору напряжения постоянного тока U к току утечки $i_{ут}$ через 60 *сек* после установления на конденсаторе измерительного напряжения определяет значение сопротивления изоляции

$$R_{из} = \frac{U}{i_{ут}}. \tag{8}$$

Сопротивление изоляции измеряют в мегомах (*Мом*), гигаомах (*Гом*) и тераомах (*Том*):

$$1\,Том = 10^3\,Гом = 10^6\,Мом = 10^{12}\,ом.$$

Минимально допустимые при комнатной температуре значения сопротивлений изоляции (в мегомах) в зависимости от типа конденсатора следующие:

$10^2 \div 10^3$ для керамических низкочастотных конденсаторов;

10^4 для керамических высокочастотных;

$7{,}5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ для слюдяных;

до 10^8 для пленочных и металлопленочных;

$5 \cdot 10^3 \div 10^5$ для бумажных;

$2 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ для металлобумажных.

При повышении температуры конденсатора в диэлектрике увеличивается число носителей зарядов и их скорость, что приводит к снижению сопротивления изоляции. Зависимость сопротивления изоляции от температуры в первом приближении можно описать эмпирическим выражением

$$\lg R_2 = \lg R_1 - \beta (t_2 - t_1), \tag{9}$$

где R_1 — сопротивление изоляции при температуре t_1;

R_2 — сопротивление изоляции при температуре t_2; β — постоянный коэффициент.

Коэффициент β зависит от типа диэлектрика и принимает значения 0,1—0,15 (для слюдяных и электролитических) и 0,3—0,4 (для бумажных и полистирольных конденсаторов). Для бумажных и металлобумажных конденсаторов емкостью более 0,2 *мкф* обычно указывают значение постоянной времени — произведение сопротивления изоляции в мегомах на емкость в микрофарадах.

Для бумажных герметизированных конденсаторов минимально допустимое значение постоянной времени обычно составляет 2000 *Мом·мкф* при 20° С, для металлобумажных на номинальные напряжения 160 и 250 *в* $RC=200$ *Мом·мкф;* на 200 *в* $RC=300$ *Мом·мкф*; на 400 *в* и более $RC=1000$ *Мом·мкф*. Такое различие допускаемых значений постоянной времени для металлобумажных конденсаторов объясняется разным числом слоев бумаги и лакировки в них для различных номинальных напряжений.

При повышении температуры значение постоянной времени снижается. Зависимость постоянной времени металлобумажных конденсаторов от температуры достаточно хорошо описывается выражением

$$(RC)_{t_2}=(RC)_{t_1}\exp\alpha(t_1-t_2), \qquad (10)$$

где $(RC)_{t_1}$ — постоянная времени при температуре t_1; $(RC)_{t_2}$ — постоянная времени при температуре t_2; α — коэффициент, равный 0,075 для конденсаторов на напряжения до 400 *в* и 0,086 на напряжения 400 *в* и более.

Для электролитических конденсаторов основной характеристикой электрической изоляции является ток утечки, величина которого может быть от долей микроампера (танталовые конденсаторы) до нескольких миллиампер (алюминиевые конденсаторы).

Для большинства электролитических конденсаторов максимально допустимый ток утечки при температуре +20° С можно определить по формуле

$$I=kCU+m, \qquad (11)$$

где I — ток утечки, *ма;* m, k — коэффициенты, зависящие от типа и емкости конденсатора; C — емкость, *мкф;* U — напряжение, *в*.

Значения коэффициентов, входящих в выражение (11) для некоторых типов электролитических конденсаторов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Значения коэффициентов, необходимых для определения тока утечки электролитических конденсаторов

Тип конденсатора	k	m	Примечание
КЭ, ЭГЦ			
<5 *мкф*	10^{-4}	0,2	При $t=+60°$ С $k=3\cdot10^{4}$
8—50 *мкф*	10^{-4}	0,1	—
>50 *мкф*	10^{-4}	0	—
К50-3			
$CU\leqslant200$	$2\cdot10^{4}$	$3\cdot10^{-3}$	—
$CU>200$	10^{-4}	0	—
К50-7	$5\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-2}$	—
К50-6	$5\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-3}$	—
ЭМ	$2\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-3}$	При $t=+70°$ С $k=0{,}5\cdot10^{-4}$
ЭТ, ЭТН	$5\cdot10^{-5}$	0	—
К53-8	10^{-4}	10^{-2}	При $t=+85°$ С $k=10^{-4}$, $m=4\cdot10^{-2}$
К52-1А, К52-1	$2\cdot10^{-6}$	10^{-3}	При $t=+85°$ С, ток утечки увеличивается примерно в 3 раза

Ток утечки электролитических конденсаторов возрастает по мере увеличения температуры и может вызывать сильный разогрев конденсатора.

Увеличение тока утечки происходит и при длительном хранении конденсаторов из-за так называемой «расформовки».

Сопротивление изоляции конденсатора необходимо учитывать в первую очередь при его эксплуатации на постоянном токе и низких частотах.

Для конденсаторов, применяемых для разделения цепей по постоянному току (например, между сеткой и анодом ламп в усилителе), и во временных цепях сопротивление изоляции должно быть достаточно большим; его снижение может вызвать нарушение нормальной работы всего устройства. Для блокировочных и фильтровых конденсаторов допустимы меньшие значения сопротивления изоляции.

8. НОМИНАЛЬНОЕ, РАБОЧЕЕ И ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Под номинальным напряжением конденсатора понимается предельно допустимое напряжение постоянного тока (или сумма напряжений постоянного и переменного токов), при котором конденсатор может работать в течение гарантируемого срока службы при максимально допустимой рабочей температуре.

Номинальное напряжение постоянного тока устанавливается с необходимым запасом по отношению к длительной электрической прочности диэлектрика, исключающим возникновение в течение гарантируемого срока службы сильного старения конденсатора, вызывающего существенное ухудшение его электрических характеристик.

Допускаемые значения амплитуды переменного тока выбираются таким образом, чтобы исключить возможность развития ионизации в конденсаторе и его нагрев сверх допускаемой предельной температуры.

Эти значения обычно приводятся в технических условиях на конденсатор. При эксплуатации конденсаторов на переменном или постоянном с переменной составляющей напряжениях следует придерживаться следующих правил:

1. Сумма постоянной составляющей и амплитуды пульсации не должна превышать номинального рабочего напряжения.

2. Амплитуда переменного напряжения не должна превышать величины, определяемой формулой

$$U = 400 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{P_р}{fC}}, \qquad (12)$$

где U — амплитуда переменного напряжения, *в;* $P_р$ — допустимая реактивная мощность, *вар;* C — емкость, *пф;* f — частота, *гц.*

3. Ток, проходящий через конденсатор, не должен превышать допустимой по ТУ величины. Максимальным значением допустимого переменного напряжения, равным номинальному, обладают керамические низковольтные высокочастотные конденсаторы. Ограничение напряжения для этих конденсаторов обусловливается допустимыми значениями реактивной мощности и тока.

Для слюдяных конденсаторов допустимое значение амплитуды переменного напряжения в процентах от номинального в соответствии с действующими ТУ приведено ниже.

Для конденсаторов типов КСО, СГМ

на номинальные напряжения до 500 *в:* 100% до 500 *гц,* 60% от 500 до 10000 *гц,* 20% более 10000 *гц*;

на номинальные напряжения 500 *в:* 50% до 500 *гц,* 30% от 500 до 10000 *гц,* 10% более 10000 *гц;*

на номинальные напряжения от 1000 до 3000 *в:* 30% до 50 *гц,* 20% от 500 до 10000 *гц,* 5% более 10000 *гц;*

на номинальные напряжения 5000 *в* и выше: 15% до 500 *гц,* 20% от 500 до 10000 *гц,* 3% более 10000 *гц.*

Для бумажных конденсаторов значение амплитуды переменного напряжения не должно превышать (в процентах от номинального): 20% на частоте 50 *гц,* 15% на 100 *гц,* 10% на 300 *гц,* 5% на 1000 *гц* и 2% на 10000 *гц.*

Международная Электротехническая комиссия рекомендует снижать переменное напряжение на частотах 1 000 и 10 000 *гц* до 3 и 1% соответственно.

Срок службы конденсаторов зависит от приложенного напряжения и окружающей температуры. Следовательно, существует принципиальная возможность в зависимости от времени, в течение которого будет эксплуатироваться конденсатор, и окружающей температуры устанавливать допустимые значения рабочих напряжений, значительно отличающиеся от номинальных. Это обстоятельство, расширяющее возможность применения конденсаторов, использовано в некоторых металлобумажных конденсаторах. В табл. 9 приведены сроки службы конденсаторов К42У-2 при различных температурах и напряжениях.

Наименьшая переменная составляющая при эксплуатации должна быть у электролитических полярных конденсаторов. Это объясняется:

— униполярной проводимостью диэлектрика (оксидного слоя), вследствие чего полуволна напряжения, создающая отрицательный потенциал на аноде, может вызвать постоянную составляющую тока через конденсатор, направленного от катода к аноду, вызывающего расформовку оксидного слоя, возрастание тока утечки, разогрев и пробой;

Таблица 9

Зависимость срока службы конденсаторов К42У-2 от температуры и приложенного напряжения

Номинальное напряжение, *в*	Срок службы										
	4000			1000			500			50	
	Температура, °С										
	70	85	100	70	85	100	70	85	100	85	100
	Допустимое напряжение, *в*										
160	160	100	50	170	130	80	200	160	100	200	160
250	250	200	100	300	230	160	350	250	200	300	250
400	400	250	150	450	350	250	500	400	300	500	400
630	630	500	300	700	550	400	750	630	500	700	630
1000	1000	800	500	1100	900	630	1200	1000	750	1200	1000
1600	1600	1300	800	1700	1500	1000	1800	1600	1200	1800	1600

— большим значением тангенса угла потерь, обусловливающим значительные активные потери в конденсаторе при воздействии переменной составляющей, его разогрев и увеличение тока утечки.

Во избежание повреждения конденсатора нельзя допускать, чтобы амплитудное значение переменной составляющей (любой формы, частоты и длительности воздействия) превышало величину приложенного постоянного напряжения, так как при этом на аноде периодически будет создаваться отрицательный потенциал.

Величина допускаемого значения переменной составляющей для электролитических конденсаторов зависит от типа конденсатора и уменьшается пропорционально частоте. Например, для конденсаторов типов К53-1, К53-1А, К53-4, К53-8 эта величина составляет (в процентах от номинального напряжения): 20% на частоте 50 *гц*, 5% на 500 *гц*, 3,5% на 1 000 *гц*, 0,8% на 10 000 *гц* и 0,5% на 20 000 *гц*.

Некоторые типы конденсаторов нежелательно использовать при напряжениях, значительно ниже номинального (особенно ниже 1 *в*), так как могут возникнуть нарушения в работе схем из-за неустойчивости внутренних контактов между обкладками и выводами, роста потерь и развития окислительных процессов, приводящих к временной или постоянной потери емкости. Примером таких конденсаторов являются конденсаторы типа БМ-1.

При низких напряжениях наиболее надежными являются конденсаторы с припаянными или приваренными контактами: керамические, стеклоэмалевые, стеклокерамические, бумажные (БМ-2, БМТ-2, К40У-9), металлобумажные (МБГ, МБГТ, МБМ, К42У-2), металлопленочные (МПГ, МПГО, К71П-2Б), фторопластовые (К72П-6).

Для отбраковки конденсаторов с заведомо низкой электрической прочностью, обусловленной грубыми случайными дефектами, заводы-изготовители проверяют конденсаторы испытательным напряжением, значительно превышающим номинальное. Конденсаторы должны выдерживать воздействие испытательного напряжения в течение короткого времени (обычно 10 *сек*) не пробиваясь.

Обычно испытательное напряжение выбирается, исходя из запаса кратковременной электрической прочности конденсатора.

Для керамических конденсаторов испытательное напряжение постоянного тока $U_{исп}$ по отношению к номинальному напряжению $U_{ном}$ составляет:

$$U_{исп} = 3U_{ном} \text{ при } U_{ном} \text{ до } 350 в;$$
$$U_{исп} = 2{,}5U_{ном} \text{ при } U_{ном} = 350 - 1000 в;$$
$$U_{исп} = 1{,}5U_{ном} + 500 в \text{ при } U_{ном} = 1000 - 3000 в;$$
$$U_{исп} = 1{,}5U_{ном} \text{ при } U_{ном} = 3 - 20 кв.$$

Для слюдяных конденсаторов испытательное напряжение выбирается обычно в два раза больше номинального, для бумажных на напряжение до 1 500 *в* $U_{исп} = 3U_{ном}$ при 1 500 *в* и выше $U_{исп} = 2U_{ном}$.

Весьма ограниченный запас электрической и тепловой прочности электролитических конденсаторов обусловливает и низкие испытательные напряжения:

при $U_{ном}$ до 350 *в* $U_{исп} = 1{,}15U_{ном}$;
при $U_{ном}$ свыше 350 *в* $U_{исп} = 1{,}1U_{ном}$.

Испытательным напряжением на заводах-изготовителях обычно проверяются все выпускаемые конденсаторы (испытание на электрическую прочность), что позволяет отбраковывать образцы с особо грубыми дефектами, но, однако, не обеспечивает безотказность при последующей

эксплуатации конденсаторов, выдержавших это испытание. У конденсаторов, истинное пробивное напряжение которых превышало испытательное на сравнительно небольшую величину, воздействие испытательного напряжения может вызвать необратимое изменение в диэлектрике, снижающее запас электрической прочности.

При повторном испытании на электрическую прочность, такие конденсаторы могут выйти из строя. Эксперименты показывают, что если достаточно большую партию конденсаторов неоднократно испытывать одним и тем же испытательным напряжением, то при последующих испытаниях всегда будет иметься некоторое количество пробитых образцов.

Исходя из сказанного, проверки конденсаторов на электрическую прочность следует стремиться уменьшать до предела, например до двух: 1) на заводе-изготовителе конденсаторов и 2) при входном контроле на заводе-потребителе.

Однако при входном контроле рекомендуется проводить испытание конденсаторов всех типов на кратковременную электрическую прочность при испытательном напряжении не выше $1{,}15U_{\text{ном}}$.

9. ИНДУКТИВНОСТЬ И РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА

Из-за наличия проводников в своей конструкции конденсаторы обладают индуктивностью. Эту индуктивность необходимо принимать во внимание в некоторых практических случаях (например, при использовании конденсатора в высокочастотных и импульсных схемах, лазерных генераторах, помехозащитных фильтрах, в устройствах высокочастотной релейной защиты и др.).

Если к элементам, изображенным на рис. 6,*а* подключить последовательно индуктивность проводящих частей L, то полное сопротивление конденсатора z будет равно

$$z = \sqrt{r^2 + (x_C - x_L)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC} - 2\pi fL\right)^2}. \tag{13}$$

Как видно из (13), емкостное сопротивление конденсатора x_C уменьшается с увеличением частоты, а индук-

тивное x_L возрастает. Характер зависимости полного сопротивления от частоты показан на рис. 9. Левая ветвь кривой определяется емкостью конденсатора, правая — его индуктивностью. Минимум полного сопротивления определяется активным сопротивлением конденсатора;

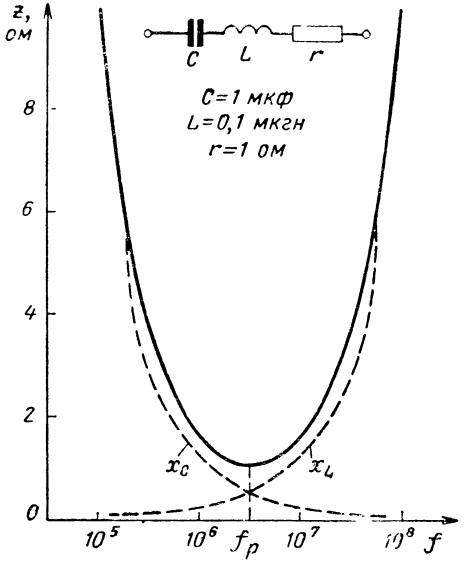

Рис. 9. Зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты.

соответствующая минимуму частота является резонансной и определяется по формуле

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (14)$$

При частотах выше резонансной сопротивление конденсатора является уже не емкостным, а индуктивным, вследствие чего эффективное использование конденсатора может быть только на частотах ниже резонансной. При увеличении частоты (до резонансной) кажущаяся емкость может увеличиваться из-за частичной компенсации емкостного сопротивления конденсатора индук-

Таблица 10

Значения индуктивности и резонансной частоты некоторых конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость, *пф*	Индуктивность, *мкн*	Разонансная частота, *Мец*
КД-1, КД-2а	1—270	1—4	5000—150
КД-2в,	680—6800		200—30
К10У-2	1,5—100	0,25—17	1000
КТ-1, КТ-2, КТ-3	1—1000	3—15	3000—40
	1100—33000		100—20
КМ-3, КМ-4, КМ-5	22—3600	2—5	800—30
	3900—15000		60—10
КВИ	1,5—4700	1—3	4000—40
К15У-1	10—4700	1,5—4	1300—25
К15У-2	47—10000	1,5—4	600—25
КСО-1, КСО-2,	10—180		1000—250
	200—100		200—100
КСО-5, КСОТ, СГМ,	1100—5100	3—5	75—40
СКС, СКМ	5600—10000		30—15
КСО-6, КСО-13	10—180		300—100
	200—1000	8—15	100—50
	1100—5100		50—25
	5600—20000		20—10
	22000—50000		10—6
КБГ-И, БМ, БГМ,	100—1000	3—5	30—100
КБГ-М, МБГИ	1100—5100		75—30
	5600—20000		30—10
МБМ, ПМ, ПСО, ФТ	22000—50000	6—10	15—7
МПГ, МПО, МПГ-Ц	$(0,1—0,5)\ 10^6$		5—2
К40У-9, К73П 6	$(0,68—1,0)\ 10^6$	10—15	2—1,5
КБГ-МП, КБГ-МН,	$(0,25—1)\cdot 10^6$	15—20	2,5—1,0
БГТ, МБГП, МБГО,	$(2,0—5)\cdot 10^6$	20—40	0,7—0,35
МБГТ, МПГ, МПГО,	$(6,0—25,0)\cdot 10^6$	50—100	0,3—0,1
ПМГП, К73П-2			
ОП	$(0,033—1)\cdot 10^6$	5—10	12—1,5
ЭТО-1, ЭТО-2, ОП	$(1—10)\cdot 10^6$	3—5	3—0,7
	$(10—80)\cdot 10^6$	5—10	0,7—0,2
	$(100—1000)\cdot 10^6$	15—20	0,15—0,035

тивным. Это изменение емкости можно определить по формуле

$$\frac{\Delta C}{C}\,\% = \frac{4\pi^2 f^2 LC}{1 - 4\pi^2 f^2 LC} \cdot 100\,\%. \qquad (15)$$

При использовании формул (13)—(15) необходимо подставлять значения емкости в фарадах, индуктивности в генри, сопротивления в омах. В табл. 10 приведены ориентировочные значения индуктивности и резонансной частоты для некоторых типов конденсаторов. Необходимо отметить, что в реальных условиях кажущаяся резонансная частота конденсатора может лежать несколько ниже из-за влияния индуктивности соединительных проводов.

Минимальной индуктивностью обладают так называемые «проходные» конденсаторы, имеющие один вывод внутри конденсатора и заземленный металлический корпус или наружный электрод.

Для уменьшения влияния индуктивности конденсаторов большой емкости на высоких частотах целесообразно применять шунтирование их конденсаторами меньшей емкости со значительно меньшей индуктивностью.

10. РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ

Диэлектрические потери и потери энергии в обкладках и выводах (арматуре) приводят к нагреванию конденсатора. Активные потери, приводящие к нагреву, определяются по формуле

$$P_a = 2\pi f U^2 C \operatorname{tg}\delta\ [вт], \qquad (16)$$

где U — приложенное эффективное напряжение, *в*; C — емкость, *ф*; f — частота, *гц*.

Величину

$$2\pi U^2 fC = P_р\ [вар] \qquad (17)$$

называют реактивной мощностью конденсатора. Реактивная мощность, на которую нагружается конденсатор при эксплуатации, не должна превышать допустимого по ТУ значения. Допустимое значение реактивной мощности определяется при разработке конденсатора из условий его теплового обмена с окружающей средой так, чтобы перегрев конденсатора не превышал установлен-

ного значения (например, для высоковольтных керамических конденсаторов +50° С сверх температуры окружающей среды).

Для конденсаторов на напряжения до 1 000 *в* допустимая реактивная мощность указывается при максимальной рабочей температуре, для конденсаторов на напряжения свыше 1 000 *в* — при некоторой определенной температуре, свыше которой необходимо снижать реак-

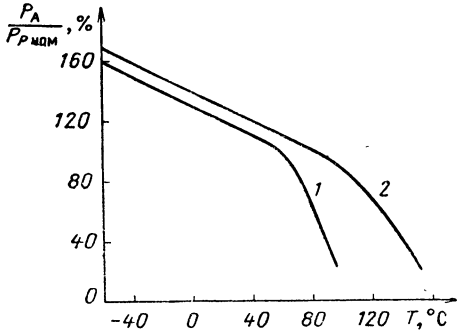

Рис. 10. Зависимость допускаемой реактивной мощности конденсаторов К15У-1, К15У-2 и К15У-3 от температуры окружающего воздуха: *1* — для конденсаторов группы М750; *2* — для конденсаторов остальных групп.

тивную мощность. Эта температура, а также величина снижения реактивной мощности оговариваются в ТУ на конденсаторы. Величина реактивной мощности может превышать номинальное значение при низкой температуре окружающей среды, а также при применении принудительного охлаждения конденсаторов (например, обдув воздухом). Условия эксплуатации конденсаторов при принудительном охлаждении должны быть согласованы с предприятием-изготовителем конденсаторов.

Для примера на рис. 10 приведена зависимость допускаемой реактивной мощности конденсаторов К15У-1, К15У-2, К15У-3 от температуры окружающего воздуха. Максимально допускаемое значение реактивной мощности $P_р$ может быть достигнуто лишь в определенном диапазоне частот (от $f_н$ до $f_в$). При частотах ниже $f_н$ реактивная мощность ограничивается рабочим напряжением конденсатора (т. е. при $f<f_н$ $2\pi f U^2 C<P_р$); уменьшение допустимой реактивной мощности при частотах выше $f_в$ обусловливается ростом потерь в металлических

частях конденсатора, вызывающих его перегрев. Во избежание такого перегрева обычно верхний предел допустимого значения тока оговаривается в ТУ.

Так, например, для слюдяных конденсаторов проходящий ток не должен превышать величины, определяемой по формуле (18)

$$i = \frac{k}{\sqrt[4]{f}}, \tag{18}$$

где ток в амперах, частота в мегагерцах, $k=2$ для КСО-1, КСО-2, КСО-5; $k=4$ для КСО-6, КСО-7, КСО-8, КСО-11, КСГ-1, КСГ-2; $k=8$ для КСО-10, КСО-12, КСО-13.

Для конденсаторов СГМ такое ограничение не вводится в связи с малыми значениями емкости, для конденсаторов КСГ дополнительно указывается, что ток не должен превышать 0,05 *а* на каждые 100 *пф* емкости.

Для керамических конденсаторов К15У-1, К15У-2, К15У-3 предельное эффективное значение тока рассчитывается по формуле

$$i = \frac{k}{\sqrt{f}}, \tag{19}$$

где $k=3{,}4\,B$ для конденсаторов с ленточными выводами (B — ширина ленты в минимальной ее части, *мм*); $k=7d$ для конденсаторов с резьбовыми выводами (d — диаметр резьбы вывода, *мм*).

На основании вышеизложенного можно рассчитать интервал частот, в котором конденсатор можно нагружать на максимально допустимую реактивную мощность, и необходимое снижение напряжения при частотах выше $f_в$.

Пример. Определить частоты $f_н$, $f_в$, максимально допустимый ток при частоте $f_в$, допустимое напряжение при частоте 10 *Мгц* для конденсатора К15У-1 ($C_{ном}=2\,200$ *пф*, $U_{ном}=12$ *кв* эфф., $P_р=145$ *ква*, $B=18$ *мм*).

Нижнюю частоту, при которой конденсатор можно нагрузить на максимально допустимую реактивную мощность, определим из формулы (17).

$$f_н = \frac{P_р}{2\pi U^2_{ном} C_{ном}} = \frac{145 \cdot 10^3}{2\pi\, 144 \cdot 10^6\, 2200 \cdot 10^{-12}} = 73 \text{ кгц}.$$

Для определения $f_в$ приравняем ток через конденсатор (выраженный через $f_в$, $P_р$, $C_{ном}$) к предельно допустимому значению тока (18) и решим полученное выражение относительно $f_в$.

$$k = 3{,}4 \cdot 18 \approx 61;$$

$$10^3 \sqrt{2\pi f_в P_1 C_{ном}} = \frac{61}{\sqrt{f_в}};$$

$$f_в = \frac{61}{10^3 \sqrt{2\pi P_1 C_{ном}}} = 1{,}36 \text{ Мгц}.$$

Множитель 10^3 введен в левую часть для приведения размерности $f_в$ под радикалом к мегагерцам.

Подставив в (19) полученное значение $f_в$, определим максимально допустимый ток через конденсатор на этой частоте

$$i = \frac{61}{\sqrt{1{,}36}} \approx 52 \text{ а}.$$

Максимально допустимый ток на частоте 10 *Мгц*, определенный в соответствии с (19), составляет 19,3 *а*.

Подставив полученное значение тока и значение емкостного сопротивления конденсатора в формулу закона Ома, определим максимально допустимое напряжение для частоты 10 *Мгц*

$$U = \frac{i}{2\pi f C_э} = 140 \text{ в}.$$

Таким образом, из-за потерь в арматуре и электродах конденсатор К15У-1 на номинальное напряжение 12 000 *в* на частоте 10 *Мгц* можно использовать только при рабочем напряжении не выше 140 *в*.

Рассмотренные в настоящем параграфе соотношения относятся только к синусоидальному напряжению. При напряжениях, содержащих, кроме основной, и высшие гармоники, общая активная мощность, выделяемая в конденсаторе, представляет сумму мощностей от каждой отдельной гармоники и может заметно превосходить величину, рассчитанную по формуле (16).

Суммарные потери от n гармоник составят

$$P_а = \omega_1 C \sum_{k=1}^{k=n} k U_k^2 \operatorname{tg} \delta_k = \eta \omega_1 C U^2 \operatorname{tg} \delta_1, \qquad (20)$$

где P_a — активная мощность, выделяемая в конденсаторе при воздействии напряжений с высшими гармониками; ω_1 — круговая частота 1-й гармоники; U_k — действующее напряжение k-й гармоники; $\operatorname{tg}\delta_k$ — тангенс угла потерь на частоте k-й гармоники; η — коэффициент возрастания потерь за счет высших гармоник; U — действующее значение несинусоидального напряжения, равное

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \cdots + U_n^2}.$$

Значение коэффициента η вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} kU_k^2 \operatorname{tg}\delta_k}{U^2 \operatorname{tg}\delta_1}. \qquad (21)$$

Для вычисления напряжений отдельных гармоник кривую напряжения раскладывают в ряд Фурье.

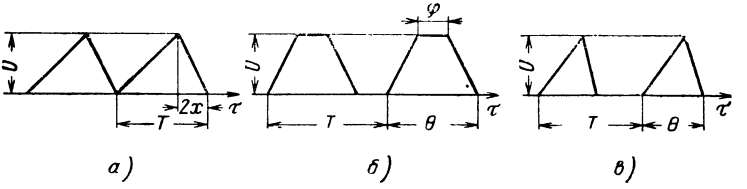

Рис. 11. К расчету активной мощности при различных формах импульсного напряжения:
а — пилообразной; *б* — трапецеидальной; *в* — треугольной.

Значения активной мощности для некоторых форм видеоимпульсов, изображенных на рис. 11, можно вычислить по формулам:

а) пилообразные импульсы

$$P_a = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta}{8} \frac{0{,}049}{\xi^2}, \qquad (22)$$

где $\xi = \frac{2x}{T}$;

ω — угловая частота следования импульсов;

б) трапецеидальные импульсы

$$P_a < \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{8} \frac{0{,}78}{\alpha^2 (1-r)^2}, \qquad (23)$$

где

$$\alpha = \frac{\theta}{T}; \quad r = \frac{\varphi}{\theta};$$

в) треугольные импульсы

$$P_a < \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{8} \frac{0{,}786}{\alpha^2}. \qquad (24)$$

В случаях несинусоидального и импульсного напряжения величина P_a не должна превосходить значения активной мощности, вычисленной по формуле

$$P_a = P_1 \operatorname{tg} \delta, \qquad (25)$$

где P_p — максимально допустимая по ТУ реактивная мощность; $\operatorname{tg} \delta$ — нормированное по ТУ значение тангенса угла потерь.

11. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Промышленностью выпускаются конденсаторы со следующими типами диэлектрика: газообразным, твердым неорганическим, твердым органическим и оксидным.

Особенностью газообразных диэлектриков является малое значение тангенса угла потерь (до 10^{-5}) и высокая стабильность электрических параметров. В качестве диэлектрика используются воздух, сжатый газ (азот, фреон, элегаз), вакуум. Конденсаторы с воздушным диэлектриком применяются в измерительной технике как образцовые емкости до нескольких тысяч пикофарад. Для высоких напряжений предназначаются газонаполненные и вакуумные конденсаторы. Сжатый газ в газонаполненных конденсаторах находится под давлением до 14 *атм*, что значительно увеличивает электрическую прочность по сравнению с воздухом.

Газонаполненные конденсаторы емкостью 50—100 *пф* имеют номинальные напряжения до 100—500 *кв*

и применяются, в основном, в высоковольтных измерительных устройствах, а конденсаторы емкостью до нескольких тысяч пикофарад имеют номинальные напряжения до 30—50 *кв* и применяются в контурах мощных передающих устройств. На частотах выше 0,5 *Мгц* для газонаполненных конденсаторов приходится снижать реактивную мощность из-за возрастания потерь в обкладках. На этих частотах более рационально применять вакуумные конденсаторы.

Вакуумный диэлектрик обладает высокой электрической прочностью, очень малыми потерями, отсутствием зависимости диэлектрической проницаемости от частоты и способен к самовосстановлению после пробоя. Вакуумные конденсаторы применяются в мощных генераторах в качестве контурных, блокировочных, фильтровых, разделительных, а также в качестве накопительных в мощных формирующих линиях.

Вакуумные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения (высокой частоты) от 5 до 45 *кв*, с номинальными емкостями от 12,5 до 1 000 *пф*, допускают максимальные токи от 12 до 125 *а*, могут эксплуатироваться на частотах до 3—30 *Мгц* при температурах от —60° С до +70, +85 или до +125° С.

Основным недостатком конденсаторов с газообразным диэлектриком является их весьма низкая удельная емкость (т. е. емкость, рассчитанная на единицу объема).

К конденсаторам с твердыми неорганическими диэлектриками относятся керамические, стеклянные, стеклокерамические, стеклоэмалевые и слюдяные конденсаторы. Неорганические диэлектрики характеризуются большой теплостойкостью и твердостью, высокой химической стабильностью, повышенными значениями диэлектрической проницаемости; многие из них имеют малые коэффициенты линейного расширения и температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости.

Керамические конденсаторы состоят из поликристаллического керамического диэлектрика, электродов, нанесенных путем вжигания благородных металлов (серебро, платина, палладий), припаянных выводов и защитного покрытия. Диэлектрик может иметь форму диска (КД-1, КД-2), трубки (КТ-1, КТ-2), прямоугольных пластин (К10-7, КП), прямоугольной призмы (КЛС, КЛГ)

и др. Составы керамических диэлектриков весьма сложны и разнообразны и обеспечивают большой набор значений диэлектрической проницаемости (от 6 до 10 000) и ТКЕ (от $+120 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ до $-2\,200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$). Керамические конденсаторы подразделяются на высокочастотные и низкочастотные, высоковольтные и низковольтные.

Основными особенностями высокочастотных керамических конденсаторов являются нормированные значения ТКЕ (табл. 5), малые потери (табл. 7), малые значения индуктивности (табл. 10). Низкочастотные конденсаторы за счет большой диэлектрической проницаемости имеют значительную удельную емкость, но, однако, и сравнительно большие значения потерь ($\operatorname{tg}\delta \leqslant \leqslant 0{,}035$).

Особенностями низкочастотных керамических конденсаторов является резкая зависимость емкости от температуры (рис. 3), а для некоторых типов конденсаторов — зависимость емкости от величины приложенного напряжения и наличие диэлектрического гистерезиса.

Низковольтные керамические конденсаторы имеют номинальные емкости от 1 *пф* до 2,2 *мкф* и номинальные напряжения от 35 до 750 *в*. Высоковольтные керамические конденсаторы имеют номинальные емкости от 1,5 до 15 000 *пф*, номинальные напряжения от 1,5 до 50 *кв*, максимально допустимые реактивные мощности от 1 *вар* до 300 *квар*. В зависимости от типа и категории керамические конденсаторы могут эксплуатироваться при температурах от $-60°$ С до $+85$, $+100$, $+125$, $+155$ и $+300°$ С.

Основными недостатками керамических конденсаторов являются их хрупкость и относительно низкая влагостойкость (за исключением герметизированных конденсаторов).

Диэлектриком в стеклянных конденсаторах служит стеклянная пленка. Электроды выполняются в виде фольги либо наносятся методом напыления металла. Хотя диэлектрическая проницаемость стекла невысока (не более 20), многослойная конструкция позволяет получать приемлемое значение удельной емкости.

Отличительной чертой стеклянных конденсаторов является их высокая теплостойкость. В зависимости от типа конденсаторы могут эксплуатироваться при темпера-

турах от —60° С до +200 или +300° С. Конденсаторы имеют номинальные емкости в диапазоне от 9,1 до 5 600 *пф* и номинальные напряжения от 125 до 1 000 *в*.

Стеклоэмалевые конденсаторы состоят из чередующихся слоев стеклоэмали и электродов (серебряной пасты). Высокая электрическая прочность стеклоэмали позволила получить конденсатор малых размеров на высокое напряжение: конденсатор ДС диаметром 30 *мм* и толщиной 12 *мм* имеет номинальное напряжение 5 000 *в*. По электрическим характеристикам и области применения стеклоэмалевые конденсаторы аналогичны керамическим высокочастотным. Конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения 300, 500, 3 000 и 5 000 *в*, с номинальными емкостями от 10 до 1 000 *пф* и в зависимости от типа могут эксплуатироваться при температурах от —60 до +100 или +155° С.

С целью увеличения удельной емкости для повышения диэлектрической проницаемости при изготовлении стеклокерамических конденсаторов в стеклоэмаль добавляется мелкоизмельченная керамика.

Стеклокерамические конденсаторы обладают высокой теплостойкостью: интервал рабочих температур составляет от —60° С до +100, +125, +155° С для конденсаторов СКМ и от —60 до +200° С для конденсаторов СКМ-Т. Конденсаторы имеют номинальные емкости от 10 до 5100 *пф*, номинальные напряжения 125, 250 и 500 *в* и ТКЕ МПО, М47, М330.

Слюда, служащая диэлектриком в слюдяных конденсаторах, представляет собой природный минерал, способный расщепляться на очень тонкие пластинки (до 0,01 *мм*). Наиболее широко применяемая в конденсаторостроении слюда мусковит имеет малые значения угла потерь ($\operatorname{tg}\delta \approx (1—2)\cdot 10^{-4}$), высокую электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость, равную семи. Слюдяные конденсаторы изготавливаются с электродами из фольги (частично КСО) или нанесенными на слюду путем испарения в вакууме или вжиганием обкладками (КСГ, СГМ и др.). Полученные таким образом конденсаторные секции накладываются друг на друга и обжимаются. Выводы соединяются с электродами либо с помощью пайки, либо с помощью вкладных контактов. Конденсаторы с фольговыми электродами имеют низкую стабильность емкости, особенно при перепадах

температуры, из-за возникновения зазора между электродами и слюдой.

Конденсаторы из посеребренной слюды допускают меньшую нагрузку током, чем фольговые, и менее пригодны для работы при больших токах. В низковольтных цепях конденсаторы с вкладными контактами могут частично или полностью терять емкость из-за появления окисной пленки.

Слюдяные конденсаторы имеют малые потери, высокое пробивное напряжение, небольшой коэффициент абсорбции и высокое сопротивление изоляции. Низковольтные слюдяные конденсаторы широко применяются в резонансных контурах, цепях блокировки и связи. Низковольтные слюдяные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения от 250 до 1 000 *в*, номинальные емкости от 47 *пф* до 0,027 *мкф* и предназначены для эксплуатации при температурах от —60 до +70, +155 или +200° С (КСОТ-200). Жаростойкие слюдяные конденсаторы (К31П-1), выполненные из слюды флогопит, работают при температурах до +500° С.

Высоковольтные слюдяные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения 1,0—25 *кв*, имеют номинальные емкости от 100 *пф* до 2,0 *мкф* и предназначены для эксплуатации при температурах от —60 до +50 или +70° С. Однако в настоящее время слюдяные высоковольтные конденсаторы применяются довольно редко из-за успешной конкуренции с ними высоковольтных керамических конденсаторов.

К конденсаторам с твердым органическим диэлектриком относятся бумажные, металлобумажные, пленочные и лакопленочные конденсаторы. Диэлектриком в этих конденсаторах служат высокомолекулярные вещества: клетчатка (целлюлоза) для бумажных конденсаторов и синтетические полярные и неполярные соединения различных типов для пленочных конденсаторов. Особенностью этих материалов является возможность использовать их в виде длинных и тонких лент, наматываемых вместе с электродами в рулон, благодаря чему при небольших значениях диэлектрической проницаемости ($\varepsilon=3$—6) удается получить конденсаторы большой удельной емкости. Основными недостатками органических диэлектриков является повышенный коэффициент линейного расширения и остаточная деформация, вызы-

вающие при изменении температуры существенное необратимое изменение емкости.

Бумажные конденсаторы изготовляют намоткой лент бумаги, разделенных металлической фольгой (обычно алюминиевой). Соединение выводов с обкладками осуществляется при помощи вкладных выводов (БМ-1) либо, при безындукционной намотке, пайкой к выступающей фольге. От 13 до 40% от объема конденсаторної бумаги приходится на долю пор, заполненных воздухом и влагой. Кроме того, бумага часто содержит проводящие включения, пронизывающие в отдельных местах ее насквозь. Для обеспечения необходимой электрической прочности в конденсаторах применяются не менее двух слоев бумаги, а намотанные конденсаторные секции для удаления влаги и заполнения пор тщательно сушат и пропитывают воскообразными веществами, минеральными маслами или синтетическими жидкостями. Для защиты от воздействия влаги конденсаторные секции помещают в защитные корпуса: бумажные (КБ), керамические (КБГ-И), металлические со стеклянными изоляторами (КБГ-М), металлические с уплотнением теплостойкой резиной (БГМТ), тонкостенные металлические с заливкой торцов эпоксидной смолой (БМ).

Бумажные конденсаторы характеризуются относительно малыми потерями, повышенной удельной емкостью, значительной индуктивностью, значительными отклонениями емкости от номинальной (обычно не менее $\pm 10\%$), повышенным значением коэффициента абсорбции.

Эффективное использование бумажных конденсаторов возможно при частотах до 1 *Мгц* в качестве блокировочных, буферных, шунтирующих, фильтровых, конденсаторов связи. Бумажные конденсаторы выпускаются на напряжения от 160 до 1 500 *в* и номинальные емкости от 470 *пф* до 10 *мкф* для низковольтных, от 2,5 до 40 *кв* и от 0,01 до 20 *мкф* для высоковольтных конденсаторов и предназначаются для эксплуатации в зависимости от типа при температурах от —60 до +70, +85, +100 или +125° С.

Металлобумажные конденсаторы имеют по сравнению с бумажными меньшие габаритные размеры (при равных номинальных напряжениях и емкостях). Для бумажных конденсаторов с тонким слоем бумаги его тол-

щина сравнима с толщиной фольги и последняя занимает существенную долю объема конденсатора. В металлобумажных конденсаторах одна сторона бумаги металлизируется перед намоткой путем нанесения под вакуумом слоя цинка или алюминия толщиной 0,03—0,05 *мкм*, что примерно в 100 раз меньше толщины фольги в бумажных конденсаторах. Для конденсаторов МБГО до 600 *в* и для остальных типов конденсаторов — до 200 *в* применяют один слой металлизированной бумаги, для более высоких напряжений — дополнительные слои. В остальном по своей конструкции металлобумажный конденсатор практически не отличается от бумажного. Малая толщина обкладок придает металлобумажным конденсаторам весьма ценное специфическое свойство — «самовосстановление» электрической прочности при единичных пробоях бумаги, так как при этом тонкий слой металла вокруг канала пробоя испаряется, изолируя место короткого замыкания. Этот эффект и сделал возможным применение одного слоя бумаги между обкладками. В процессе производства металлобумажные конденсаторы проходят электрическую тренировку при которой изолируются проводящие включения или слабые места диэлектрика путем разрушения обкладок вокруг дефектного участка и повышается сопротивление изоляции.

Однако сопротивление изоляции металлобумажных конденсаторов все же ниже, чем у бумажных. Это обстоятельство, а также возможные при эксплуатации единичные случаи пробоя с последующим самовосстановлением ограничивают применение металлобумажных конденсаторов, которые, в основном, применяются в цепях развязок, блокировок и фильтров.

Металлобумажные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения от 160 до 1 500 *в*, номинальные емкости от 0,022 до 160 *мкф* и предназначены в зависимости от типа для эксплуатации при температурах от —60 до +60, +70 или +100° С.

Конденсаторы с диэлектриком из синтетических пленок разделяются на следующие основные группы:

а) конденсаторы из неполярных пленок (полистирол, фторопласт),

б) конденсаторы из полярных пленок (полиэтилентерефталат),

в) комбинированные конденсаторы (пленка и бумага),

г) лакопленочные конденсаторы.

По конструкции и технологии изготовления пленочные конденсаторы не отличаются существенно от бумажных и металлобумажных. Однако пленочные конденсаторы с металлизированными обкладками по сравнению с металлобумажными могут выдерживать меньшее число пробоев, при которых сохраняется эффект «самовосстановления». Основными преимуществами конденсаторов из неполярных пленок являются очень малые потери (на порядок ниже, чем у бумажных), очень высокие значения сопротивления изоляции и низкая абсорбция. Постоянная времени при комнатной температуре для этих конденсаторов превышает 10^4—10^6 *Ом.мкф* и мало зависит от температуры. Коэффициент абсорбции полистирольных и фторопластовых конденсаторов обычно находится в пределах 0,01—0,1%, что позволяет применять эти конденсаторы в счетнорешающих устройствах, в цепях с большой постоянной времени и в цепях точной выдержки времени. Высокое значение постоянной времени обусловливает их применение в электрических дозиметрах, основанных на конденсаторном принципе, и в измерительной технике. Области применения фторопластовых и полистирольных конденсаторов существенно не различаются; фторопластовые конденсаторы должны применяться при повышенных температурах и более жестких требованиях к электрическим параметрам.

Конденсаторы из неполярных пленок выпускаются на номинальные напряжения от 160 до 1 000 *в* (низковольтные), от 10 до 20 *кв* (высоковольтные), на номинальные емкости от 100 *пф* до 10 *мкф* (низковольтные) и от 120 *пф* до 0,1 *мкф* (высоковольтные). Конденсаторы предназначаются для эксплуатации при температурах от —60 до +60, +70, +100, +125° С (полистирольные), от —60 до +155 или +200° С (фторопластовые) и от 0 до +60° С (полистирольные высоковольтные).

Для уменьшения габаритных размеров пленочных конденсаторов применяется полярная пленка полиэтилентерефталат, имеющая бо́льшее значение диэлектрической проницаемости ($\varepsilon=3{,}3$) по сравнению с фторопластом ($\varepsilon=2$) и полистиролом. Полиэтилентерефталатные конденсаторы имеют потери такого же порядка, как

и бумажные конденсаторы, но большее значение сопротивления изоляции и меньшую абсорбцию. Эти конденсаторы используются в тех же целях что и бумажные при повышенных требованиях к сопротивлению изоляции и абсорбции. Полиэтилентерефталатные конденсаторы выпускаются с фольговыми или металлизированными обкладками на номинальные напряжения от 50 до 300 *в* с диапазоном номинальных емкостей от 1 000 *пф* до 15 *мкф* и предназначены для эксплуатации при температурах от —60 до +70, +85, +100 или +125° С (для низковольтных конденсаторов). Высоковольтные полиэтилентерефталатные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения от 2,5 до 10 *кв* с диапазоном номинальных емкостей от 5100 *пф* до 4 *мкф* для тех же интервалов рабочих температур.

Применение в конденсаторах комбинированного диэлектрика позволяет существенно повысить электрическую прочность, несколько повысить сопротивление изоляции и уменьшить потери по сравнению с бумажными конденсаторами. Отличительной чертой конденсаторов с комбинированным диэлектриком является повышенная надежность. Область применения комбинированных конденсаторов такая же как и у бумажных. Низковольтные комбинированные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения от 250 до 1500 *в*, с диапазоном номинальных емкостей от 0,022 до 2,2 *мкф* и предназначены для эксплуатации при температурах от —60 до +100 или +125° С.

Высоковольтные комбинированные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения от 1,6 до 50 *кв* с диапазоном номинальных емкостей от 1 000 *пф* до 2 *мкф* и предназначены для эксплуатации при температурах от —60 до +100° С.

Импульсные комбинированные конденсаторы имеют малый интервал рабочих температур (от —10, —40, —60° С до +40, +50 или +60° С), номинальные напряжения 1,5—3,0 *кв* и характеризуются большими значениями номинальной емкости (от 25 до 100 *мкф*).

Наибольшей удельной емкостью среди конденсаторов с органическим диэлектриком обладают лакопленочные конденсаторы с очень тонкими металлизированными полярными пленками (К76П-1, К76П-2). Эти конденсаторы по удельной емкости приближаются к электро-

литическим, но по сравнению с ними имеют значительно лучшие электрические характеристики и допускают эксплуатацию при знакопеременном напряжении.

Лакопленочные конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения 50, 100 и 150 *в*, имеют диапазон номинальных емкостей от 0,47 до 22 *мкф* и предназначены для эксплуатации при температурах от —60 до +85° С.

Диэлектриком в электролитических конденсаторах служит тонкая оксидная пленка, нанесенная на одну из обкладок конденсатора (анод) электролитическим путем. Оксидную пленку, обладающую высокой электрической прочностью и диэлектрической проницаемостью, могут образовывать на своей поверхности алюминий, тантал, ниобий и титан, которые и применяются в качестве анодов.

Вторым электродом, контактирующим с оксидной пленкой, служит жидкий или полужидкий электролит (в жидкостных электролитических конденсаторах), пропитывающий волокнистую прокладку (полужидкий электролит обладает большой вязкостью), пастообразный электролит (в сухих электролитических конденсаторах) или полупроводник (в оксиднополупроводниковых конденсаторах).

Электрическая прочность оксидной пленки в десятки раз превосходит электрическую прочность всех других диэлектриков, что позволяет использовать в электролитических конденсаторах очень тонкую оксидную пленку и получать самую высокую для конденсаторов удельную емкость. Оксидная пленка имеет униполярную проводимость, вследствие чего эксплуатация электролитических конденсаторов возможна только при положительном потенциале на аноде. При подаче на анод отрицательного потенциала проводимость оксидной пленки резко возрастает, и через конденсатор проходит большой ток, способный вызвать его разрушение. Промышленностью выпускаются жидкостные танталовые и ниобиевые конденсаторы с объемнопористым анодом, сухие, а также оксиднополупроводниковые алюминиевые и танталовые конденсаторы.

Существенными недостатками электролитических конденсаторов являются: значительные токи утечки и потери (особенно для алюминиевых конденсаторов) и

малая допустимая величина переменной составляющей рабочего напряжения. В связи с этим электролитические конденсаторы, как правило, применяются только при постоянном и пульсирующем напряжениях на низких частотах (обычно не выше 20 *кгц*) в качестве фильтровых и блокировочных, а также в накопительных устройствах. Лучшие электрические характеристики среди электролитических конденсаторов имеют танталовые и, особенно, оксидно-полупроводниковые конденсаторы (интервал рабочих температур от —80 до +125° С, $\operatorname{tg}\delta = 0{,}08—0{,}10$; ток утечки 1—8 *мка*). Характерной особенностью оксидно-полупроводниковых конденсаторов является полное отсутствие роста потерь при понижении температуры вплоть до —80° С. Диапазон номинальных напряжений оксидно-полупроводниковых конденсаторов составляет 6—30 *в*. Жидкостные танталовые конденсаторы (ЭТО) могут эксплуатироваться при температурах от —60 до +100° С, а также до +155° С (категория *Б*) и до +200° С (категория *А*) с некоторым снижением номинального напряжения. Интервал рабочих температур сухих электролитических конденсаторов значительно уже и составляет:

—60 ÷ +85° С для алюминиевых групп ОМ,
—50 ÷ +60° С для алюминиевых групп ПМ,
—40 ÷ +60° С для алюминиевых групп М,
—10 ÷ +60° С для алюминиевых групп Н.

Электролитические конденсаторы выпускаются со значениями номинальных емкостей и напряжений, лежащими в следующих диапазонах:

— танталовые объемнопористые (жидкостные) 2—1 000 *мкф*, 6—600 *в*,

— танталовые фольговые (сухие) 5—500 *мкф*, 6—150 *в*,

— алюминиевые 5—5 000 *мкф*, 3—500 *в*,

— оксидно-полупроводниковые 0,033—100 *мкф*, 6—30 *в*.

Развитие микроэлектроники привело к разработке конденсаторов для тонкопленочных и интегральных полупроводниковых схем.

Для получения пленочных конденсаторов используются диэлектрики, стойкие к повышенным температурам и их перепадам. Такими диэлектриками являются неорганические пленки, ряд редкоземельных окислов и

фтористых соединений, полученных путем непосредственного испарения в вакууме или окисления металлических пленок. При изготовлении конденсатора на подложку, являющуюся механической опорой, наносятся нижняя обкладка, диэлектрическая пленка и верхняя обкладка.

Эти конденсаторы в составе пленочных схем имеют номинальные значения емкости от 75 до 10 000 *пф* (при удельной емкости от 7 000 до 20 000 *пф/см*^{2}), тангенс угла потерь от 0,002 до 0,01.

В качестве конденсаторов для полупроводниковых интегральных схем используется *р-п* переход или слой двуокиси кремния, выращенный на полупроводнике.

II. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Электрические параметры конденсаторов измеряются неоднократно в процессе производства, межоперационного и выходного контроля, при приемке заказчиком. В этих случаях измерения производят по отработанным методикам на специализированных измерительных приборах. Необходимость измерения параметров конденсаторов возникает часто и после того, как конденсаторы вышли с завода-изготовителя: на входном контроле перед установкой конденсаторов в аппаратуру, при хранении конденсаторов на складах, в процессе эксплуатации при очередных проверках и ремонтах аппаратуры, при анализе причин отказа аппаратуры и т. д.

При подобных измерениях из-за применения приборов, не предназначенных для измерения параметров конденсаторов данного типа, или неправильной методики измерения могут иметь место ошибки в оценке параметров и работоспособности конденсаторов, а также случаи повреждения конденсаторов.

Наиболее часто встречающимися ошибками является несоблюдение требуемых значений частоты и амплитуды измерительного напряжения.

Методы измерения электрических параметров, а также методы механических и климатических испытаний

Таблица 11

Основные характеристики приборов, рекомендуемых для измерения параметров конденсаторов

Тип прибора	Измеряемая величина	Тип измеряемых конденсаторов	Краткая техническая характеристика					
			Диапазон емкостей, *пф*	Погрешность измерения *C*	Диапазон по tg δ	Погрешность измерения tg δ	Рабочая частота, *гц*	Сопротивление изоляции, ток утечки и погрешность их измерения
ПРК-4	Емкость	Высокочастотные конденсаторы	10—1000	±(0,5%+ +0,2 *пф*)	—	—	10^6	—
Е12-1 (ИИЕВ-1)	То же	То же	1—5000	±(5%+0,05 *пф*) при C<10 *пф*, ± (0,5%+ +0,4 *пф*) при C>10 *пф*	—	—	$0{,}3 \cdot 10^6$	—
							$0{,}7 \cdot 10^6$	—
ИПП-5	Тангенс угла потерь	„ „	10—100	—	$0{,}5 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-2}$	± (5%+1 · 10^{-4})	10^5	—
ИПП-6	То же	„ „	100—1000	—	$0{,}5 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-2}$	± (5%+1 · 10^{-4})	10^6	—
ИПП-7	Тангенс угла потерь	„ „	10^3—10^4	—	$0{,}5 \cdot 10^{-4}$—0,02	±(5%+1 · 10^{-4})	$0{,}3 \cdot 10^5$	—
ИЕН-2 ИЕН-3	Емкость, тангенс угла потерь, ток утечки	Электролитические, бумажные	500—$5 \cdot 10^9$	± (2÷5) %	0,01—0,5	±(10÷20) %	50 и 1000	0,1÷50 *ма* ±1,5%
РМЭ-8	То же	Электролитические	10^4—10^{10}	± (2÷3) %	0,005—1,0	±(5%+0,005)	50	0,1 *мка*÷10 *ма* ±2,5%
ИЕ-1	Емкость	Высокочастотные	0,2—1010	± (1%+0,2 *пф*)	—	—	$465 \cdot 10^3$	—
ИЕ-2	То же	То же	0,2—1000	± (0,5%+ +0,2 *пф*)	—	—	$500 \cdot 10^3$	—
МЦЕ-1	Емкость, тангенс угла потерь	Низкочастотные	10—10^7	± (0,5%+10 *пф*) при C<0,01 *мкф*), ±0,2% при C>0,01 *мкф*)	$2 \cdot 10^{-4}$—0,02	± (2%+2 · 10^{-1}) при C>0,01 *мкф*	1000	—
ТО-2	Сопротивление изоляции	Все конденсаторы за исключением электролитических, лакопленочных	до $3 \cdot 10^7$	—	—	—	Постоянное напряжение 100±2 *в*	3÷3 · 10^6 *Мом*, ±20%

устанавливает ГОСТ 6580—63 «Конденсаторы электрические постоянной емкости. Методы испытаний».

Нормальными условиями для проведения измерений являются:

температура 25±10° С,

относительная влажность воздуха 65±15%,

атмосферное давление 750±30 *мм рт. ст.*

Если конденсаторы находились в условиях, отличающихся от указанных, то перед измерением они должны быть выдержаны в нормальных условиях не менее 24 *час.*

В табл. 11 приведены типы и краткие технические характеристики приборов, рекомендуемых для измерения параметров конденсаторов.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ

Измерение емкости должно производиться при указанных в действующих ТУ величинах напряжения и частоты измерительными приборами с погрешностью в 3—5 раз меньшей, чем допустимое отклонение емкости от номинала. Конденсатор для измерения подключается непосредственно к прибору с помощью предусмотренных у прибора приспособлений — колодок с контактными губками или зажимов с медными проводами.

Конструкция колодок или длина проводов должны быть такими, чтобы вносимая дополнительная погрешность не превышала 10% от допускаемого отклонения емкости. Вывод конденсатора, соединенный с корпусом или с внешним электродом (для керамических конденсаторов), подключают к заземленной клемме измерительного прибора или к клемме с меньшим потенциалом относительно земли.

Измерение последовательной емкости электролитических конденсаторов производят методом моста при поляризующем напряжении постоянного тока. Значения поляризующих напряжений указаны в ТУ.

При оценке отклонения емкости от номинального значения следует учитывать, что фактическое отклонение может отличаться от измеренного на погрешность прибора.

При оценке изменения емкости в результате воздействия на конденсатор различных факторов (температу-

ры, влажности, вибрации и др.) следует учитывать, что фактическое изменение емкости может отличаться от измеренного на удвоенную погрешность прибора.

Измерение тангенса угла потерь из-за сложной природы этой величины требует особой тщательности. Удлинительные провода, плохие контакты, наличие паразитных электрических полей могут значительно исказить результаты измерений. Тангенс угла потерь конденсаторов должен измеряться при указанных в ТУ значениях напряжения и частоты измерительным прибором с указанной в технических условиях на конденсаторы погрешностью.

Тангенс угла потерь электролитических конденсаторов измеряют при указанной в ТУ величине поляризующего напряжения постоянного тока.

2. ПРОВЕРКА КРАТКОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Электрическая прочность обычно проверяется путем подведения на 10 *сек* испытательного напряжения постоянного тока к выводам конденсатора, а в некоторых случаях между соединенными вместе выводами и корпусом конденсатора. Иногда электрическая прочность конденсаторов проверяется переменным (чаще 50 *гц*) или импульсным напряжением, что специально оговаривается техническими условиями. При испытании на переменном напряжении необходимо учитывать, какое значение напряжения (амплитудное $U_{\text{ампл}}$ или эффективное $U_{\text{эфф}}$) указывается в технических условиях, имея в виду, что

$$U_{\text{ампл}} = \sqrt{2}\, U_{\text{эфф}}. \qquad (26)$$

В конденсаторах с неметаллическими корпусами проверку электрической прочности изоляции также проводят между соединенными вместе выводами и электродом из металлической фольги, плотно охватывающей корпус конденсатора. Между испытательным электродом и оголенными частями выводов во избежание электрического разряда должен быть зазор не менее 1 *мм* на 1 *кв* испытательного напряжения.

Однако для некоторых типов конденсаторов такая проверка не предусмотрена и в этих случаях указывает-

ся, что проверка электрической прочности производится «между выводами». Испытательное напряжение подается плавно от нуля до заданной величины в течение 3—5 *сек* (или другого заданного времени), отсчет времени испытания производится с момента достижения напряжением установленной величины, которая должна измеряться прибором класса точности не ниже 2,5.

При испытании конденсаторов с металлизированными обкладками допускаются отдельные пробои диэлектрика, не вызывающие потери работоспособности конденсатора.

После испытания конденсаторы должны быть разряжены через сопротивление не менее 3 *ком* для конденсаторов на номинальное напряжение до 500 *в* включительно и 10 *ком* для конденсаторов на номинальное напряжение свыше 500 *в*. При этом разрядный ток (определяющийся, в основном, сопротивлением, на которое разряжается конденсатор) не должен превышать 1 *а*.

3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ИЛИ ТОКА УТЕЧКИ

Измерение сопротивления изоляции производится методом измерения силы тока, проходящего через конденсатор, или методом саморазряда.

Определение сопротивления изоляции методом измерения силы тока, проходящего через конденсатор, должно производиться при напряжениях, указанных в табл. 12.

Таблица 12

Напряжения, при которых измеряют сопротивление изоляции конденсаторов

Номинальное напряжение испытываемого конденсатора	Измерительное напряжение
Менее 100 *в*	10±1,5 *в*
От 100 до 500 *в*	100±15 *в*
500 *в* и выше	500±50 *в*

Отсчет величины сопротивления должен производиться через 60±5 *сек* после установления на конден-

саторе измерительного напряжения. Погрешность измерительного прибора не должна превышать ±20%.

При измерении сопротивления изоляции методом саморазряда заряженный от стабильного источника постоянного тока конденсатор до напряжения U_1 выдерживают в нормальных условиях в течение 24 *час* или другого времени, указанного в технических условиях. Величину сопротивления изоляции определяют в соответствии с выражением

$$R_{из} = \frac{0{,}434\,t}{(\lg U_1 - \lg U_2)\,C}, \qquad (27)$$

где $R_{из}$ — сопротивление изоляции, *Ом*; U_2 — величина остаточного после саморазряда напряжения, *в*; C — емкость конденсатора, *мкф*.

Измерение тока утечки производится при напряжении постоянного тока, равном номинальному.

Ток утечки и напряжение измеряют приборами класса точности не ниже 2,5. Отсчет величины тока утечки производят через 60±5 *сек* после подачи на конденсатор напряжения. Для некоторых типов конденсаторов перед измерением тока утечки техническими условиями предусмотрена выдержка конденсатора под номинальным напряжением в течение заданного времени.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

Измерение собственной индуктивности конденсаторов производится резонансным методом (для индуктивностей более 0,2 *мкгн*) или методом определения периода затухающих колебаний разрядного устройства (для индуктивностей 0,002—0,2 *мкгн*). Собственную индуктивность при измерении резонансным методом (например, с помощью куметра) вычисляют по формуле

$$L_c = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}, \qquad (28)$$

где L_c — собственная индуктивность конденсатора, *гн*; f_0 — резонансная частота, *гц*; C — емкость конденсатора, *ф*.

При измерении индуктивности методом определения периода затухающих колебаний, заряженный конденса-

тор разряжают на катушку индуктивности и подсчитывают (например, при помощи осциллографа с послесвечением) средний период первых трех колебаний.

Собственную индуктивность конденсатора вычисляют по формуле

$$L_c = \frac{25{,}3T^2}{C} - L_0, \qquad (29)$$

где L_c — собственная индуктивность конденсатора, *мкгн*; C — емкость конденсатора, *мкф*; T — средний период, *мксек*; L_0 — собственная индуктивность разрядного устройства, *мкгн*.

5. ПРОВЕРКА СТАБИЛЬНОСТИ ЕМКОСТИ

При проверке стабильности емкости определяют отсутствие в колебательном контуре, в который включается исследуемый конденсатор, высокочастотных колебаний, возникающих из-за скачкообразного изменения емкости («мерцания») или ионизации. Проверка может проводиться на установке, собранной по схеме, изображенной на рис. 12.

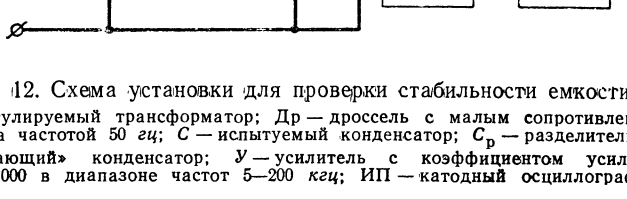

Рис. 12. Схема установки для проверки стабильности емкости:
Тр — регулируемый трансформатор; Др — дроссель с малым сопротивлением для тока частотой 50 *гц*; С — испытуемый конденсатор; $C_р$ — разделительный «немерцающий» конденсатор; У — усилитель с коэффициентом усиления 600—1 000 в диапазоне частот 5—200 *кгц*; ИП — катодный осциллограф.

На автотрансформаторе устанавливают заданное напряжение, амплитуда которого не должна превышать величины номинального напряжения постоянного тока испытуемого конденсатора. На экране осциллографа должна наблюдаться чистая синусоидальная кривая (рис. 13,*а*). Если на синусоиде имеются высокочастотные всплески (рис. 13,*б*), емкость конденсатора нестабильна. Испытание проводится в течение 10 *сек*. Чув-

ствительность осциллографа задается в технической документации на конденсаторы.

Подобным образом работает и стандартный прибор для измерения стабильности емкости — ИСК.

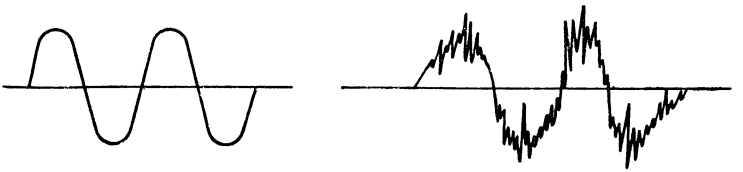

Рис. 13. Форма кривой измерительного напряжения при «немерцающем» (*а*) и «мерцающем» (*б*) конденсаторе *С*.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕГРЕВА ПРИ НАГРУЗКЕ ДОПУСТИМОЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ

Конденсаторы выдерживают под напряжением высокой частоты до установления теплового равновесия. Частоту, при которой проводят испытания, вычисляют по формуле

$$f = \frac{P_р}{2\pi C U^2}, \qquad (30)$$

где f — частота, *гц*; $P_р$ — допустимая реактивная мощность, *вар*; C — емкость конденсатора, *ф*; U — номинальное напряжение высокой частоты, *в*.

Эффективное значение тока, проходящего через конденсатор, не должно превышать заданной предельной величины (см. § 10, гл. I). Температура перегрева наиболее нагретой части поверхности конденсатора относительно температуры окружающей среды не должна превышать допустимого значения. Температуру конденсатора измеряют при помощи термопары с потенциометром или милливольтметром, термометра сопротивления или любого другого метода с погрешностью не более ±2° С.

7. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ И ПРЕДЪЯВЛЕНИЕ ПРЕТЕНЗИЙ К КАЧЕСТВУ КОНДЕНСАТОРОВ (РЕКЛАМАЦИИ)

Выпускаемые заводами конденсаторы проходят контроль на соответствие основных параметров требованиям технической документации.

В некоторых случаях (особенно при изготовлении особо ответственной аппаратуры, после хранения конденсаторов на складах и т. п.) целесообразна организация на заводах-потребителях, изготавливающих или разрабатывающих электронную аппаратуру, входного контроля конденсаторов. Целью входного контроля является дополнительная проверка поступающих конденсаторов по параметрам, определяющим работоспособность аппаратуры, для которой они предназначаются.

Проверка этих параметров должна осуществляться в соответствии с указанными в технических условиях на конденсаторы нормами, режимами и методами испытаний. Объем проверки определяется инструкцией по входному контролю, которая должна содержать:

— полное наименование проверяемых конденсаторов;

— номера технических условий или стандарта на эти конденсаторы;

— пункты технических условий (технические требования, правила приемки, методы испытания), по которым осуществляется проверка;

— указания о дополнительной маркировке конденсаторов, прошедших входной контроль;

— срок, в течение которого конденсаторы могут быть использованы для монтажа в аппаратуру без дополнительной перепроверки.

Вместо ссылок на пункты технической документации, по которым осуществляется проверка, в инструкции могут быть указаны конкретные технические требования, режимы и методы испытаний и измерений.

Основные пункты проверок должны выбираться из раздела приемо-сдаточных (контрольных) испытаний (например, внешний вид, отклонение емкости от номинальной, тангенс угла потерь, сопротивление изоляции).

При необходимости в инструкции могут включаться и требования из раздела периодических (типовых) испытаний (например, температурный коэффициент емкости, испытания при крайних рабочих температурах). Крайне нежелательны проверки, содержащие термоудары, термоциклы, вибрации, превышающие 5 *мин,* проверки испытательным напряжением выше 1,15 $U_{ном}$, ресурсные испытания, а также проверка в режимах, отличающихся от указанных в технической документации на конденсаторы. Если такие проверки необходимы, то

прошедшие проверку конденсаторы уже не могут использоваться для монтажа в аппаратуру.

Для отбраковки конденсаторов с грубыми дефектами, не выявленными в процессе производства и не обнаруживаемыми обычными измерениями, рекомендуется производить тренировку выдержкой при максимальной температуре под номинальным электрическим напряжением. Тренировку целесообразно проводить для конденсаторов, предназначенных для аппаратуры повышенной надежности. Время тренировки обычно выбирают 50—250 *час.*

Для бумажных конденсаторов в качестве метода отбраковки особо ненадежных конденсаторов может быть рекомендован метод импульсной тренировки. Форма импульса зависит от соотношения длительности фронта, спада и горизонтальной части его. Наиболее эффективной частью импульса с точки зрения отбраковки ненадежных конденсаторов является фронт, в связи с чем на него рационально отводить бо́льшую часть времени. Разряд конденсатора, обусловливающий спад импульса, целесообразно производить сначала через сопротивление, увеличивающееся синхронно со временем разряда до определенного момента, а затем через малое сопротивление, ограничивающее длительность импульса.

Конкретные режимы тренировок следует согласовывать с заводом-изготовителем конденсаторов.

Применяемая для проверок измерительная и контрольная аппаратура должна соответствовать требованиям на аналогичную аппаратуру, используемую заводом-изготовителем конденсаторов и подвергаться периодической калибровке. Если аппаратура не отвечает указанным требованиям, то все отклонения должны быть согласованы с заводами-изготовителями конденсаторов.

Конденсаторы, не соответствующие требованиям технической документации на входном контроле, а также вышедшие из строя в процессе испытаний, хранения или эксплуатации, подлежат рекламации и возврату на завод-изготовитель, который несет материальную ответственность за признанные рекламации и должен безвозмездно заменить дефектные конденсаторы. Рекламации не подлежат конденсаторы, условия монтажа, эксплуатации или хранения которых не соответствуют требова-

ниям технической документации. На забракованные конденсаторы составляются рекламационные акты, где указываются реальные величины параметров, пункты технической документации, по которым производится рекламация, и условия испытаний, хранения или эксплуатации (температура, влажность, напряжение и пр.), при которых произошел отказ.

Поврежденные конденсаторы в процессе их эксплуатации должны демонтироваться из аппаратуры с предосторожностями, исключающими их повреждение. При невозможности извлечения конденсаторов из аппаратуры без повреждения рекомендуется вызывать для анализа отказа представителя завода-изготовителя конденсаторов.

Завод-изготовитель в установленные сроки рассматривает рекламации конденсаторов, оформляет результаты рассмотрения рекламации актом и отправляет его на завод-потребитель конденсаторов. Этот акт обычно должен содержать и мероприятия по устранению причин, вызвавших отказ конденсатора.

III. НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Бурное развитие радиоэлектроники, чрезвычайно возросшая сложность радиооборудования привели к росту случаев его отказов, к увеличению расходов на ремонт, профилактику и на содержание квалифицированного обслуживающего персонала.

До 3—6% отказов электронного оборудования обусловлено выходом из строя конденсаторов.

В первую очередь применительно к радиоэлектронным устройствам и возникла новая научная дисциплина — теория надежности, изучающая общие закономерности, которых следует придерживаться при проектировании, испытаниях, изготовлении, приемке и эксплуатации изделий для получения максимальной эффективности от их использования. Параметры, характеризующие

надежность изделия, являются статистическими величинами и для их описания используются законы математической статистики. Применительно к элементам электронной техники, в том числе и к конденсаторам, в настоящее время в технической документации используется следующая терминология.

Под надежностью конденсатора понимают его свойство сохранять работоспособность и параметры (емкость, сопротивление изоляции, тангенс угла потерь) в пределах норм при эксплуатации (или испытании) в заданном режиме в течение заданного времени.

Для определения или контроля количественных показателей надежности проводят испытания на надежность на выборке определенного размера. Количественные показатели надежности — это величины, с помощью которых количественно оценивается надежность; основными из них являются: вероятность безотказной работы P на заданное время t и интенсивность отказов λ.

Вероятность безотказной работы конденсаторов — это вероятность того, что в определенном режиме испытаний (или эксплуатации) в течение заданного времени не возникает отказ. Статистически она определяется как отношение количества исправных конденсаторов $N-n$ за время испытаний t к общему числу конденсаторов, поставленных на испытание в данном режиме

$$P=\frac{N-n}{N}. \tag{31}$$

Интенсивность отказов характеризует степень надежности конденсатора в каждый данный момент времени. Статистически она определяется как число отказов Δn_i в интервале времени Δt_i, отнесенное к числу конденсаторов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени

$$\lambda(t)=\frac{\Delta n_i}{(N-n_i)\,\Delta t_i}\left[\frac{1}{час}\right], \tag{32}$$

где n_i — общее число отказавших конденсаторов к началу рассматриваемого промежутка времени.

Под отказом конденсатора понимают событие, заключающееся в том, что он теряет работоспособность или хотя бы один из параметров — критериев годности — пе-

рестает удовлетворять установленным нормам. Отказы могут быть полными и условными (параметрическими).

Полный отказ возникает в результате нарушения электрической или механической прочности конденсатора (например, обрыв соединений между элементами конденсатора, пробой диэлектрика) и приводит к полной потере его работоспособности. Условный (параметрический) отказ конденсатора обусловливается уходом од-

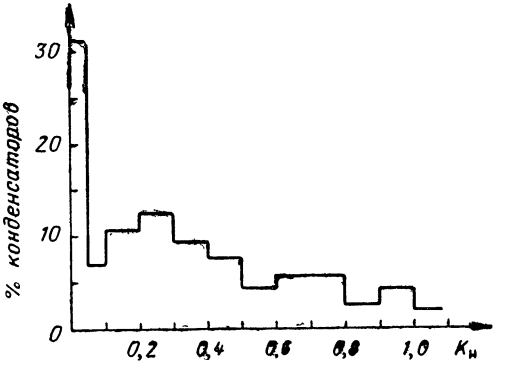

Рис. 14. Распределение конденсаторов в аппаратуре по коэффициенту нагрузки.

ного из параметров (обычно сопротивление изоляции или ток утечки, тангенс угла потерь, отклонение емкости от номинальной или от первоначального значения) за установленные в качестве критериев годности нормы.

Твердо установленных критериев параметрических отказов конденсаторов не существует. Действительно, если для прецизионной аппаратуры уход емкости контурного конденсатора на $\pm 1\%$ от первоначального значения может привести к отказу, то такое изменение емкости конденсатора фильтра практически останется незаметным.

Обычно в аппаратуре конденсаторы эксплуатируются при нагрузках, значительно меньших, чем максимально допустимые по ТУ. На рис. 14 приведено распределение конденсаторов в одном из типов аппаратуры по коэффициенту нагрузки, под которым здесь понимается отношение рабочего напряжения к номинальному. Поэтому указываемые в ТУ критерии отказов и параметры

надежности конденсаторов при максимально допустимых нагрузках, играющие значительную роль при контроле уровня производства и для сравнительной оценки надежности конденсаторов различных типов, могут использоваться с целью расчета надежности электронной аппаратуры только при наличии коэффициентов пересчета к эксплуатационным режимам.

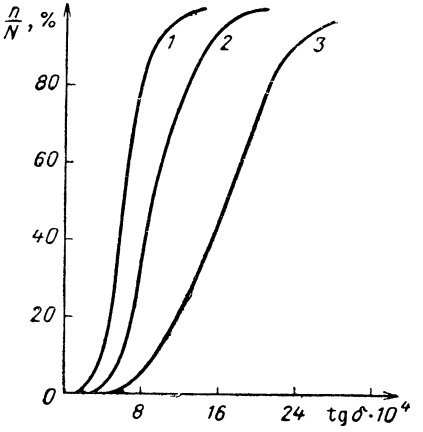

Рис. 15. Распределение тангенса угла потерь конденсаторов КТ-1 М700 при различных продолжительностях испытаний на надежность:
1 — 0 *час*; *2* — 2 000 *час*; *3* — 10 000 *час*.

Ориентировочно можно считать, что отношение интенсивности отказов конденсаторов при их эксплуатации к гарантируемым ТУ значениям составляет 0,01 для стационарной и полустационарной аппаратуры, 0,04 — для корабельной и 0,4 — для самолетной.

Значительный интерес представляют интегральные распределения параметров конденсаторов при различных временах испытаний или эксплуатации. По таким распределениям легко подсчитать долю конденсаторов, параметры которых находятся в заданных пределах в течение заданного времени. На рис. 15 приведен пример такого распределения для тангенса угла потерь конденсаторов КТ-1.

Все вышеприведенные определения параметров надежности относятся к их опытным значениям, получен-

ным на основании испытаний выборок из выпущенной продукции или по сведениям о поведении конденсаторов в процессе эксплуатации. В табл. 13 приведены опытные значения интенсивности отказов конденсаторов различных типов, рассчитанные по данным эксплуатации телевизоров. Значительный интерес представляют и доверительные границы параметров надежности, которые часто указываются в технической документации на конденсаторы и используются при расчете надежности радиоаппаратуры. Доверительные границы определяются по опытным значениям и показывают с заданной достоверностью (доверительной вероятностью), в каких пределах лежат параметры для всех выпускаемых конденсаторов данного типа или вида. В этом случае достоверность означает вероятность того, что оцениваемый параметр находится между доверительными границами. Различают нижнюю и верхнюю доверительные границы. Для потребителей конденсаторов наибольший интерес представляет нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы или верхняя доверительная граница интенсивности отказов.

Расчет доверительных границ производится по законам математической статистики, каждому числу отказов при определенной достоверности соответствует своя верхняя доверительная граница. Например, при достоверности 0,9 опытным значениям числа отказов n будут соответствовать следующие верхние доверительные границы $n_{\text{верх}}$:

$$n=0 \quad n_{\text{верх}}=2{,}3; \quad n=1 \quad n_{\text{верх}}=3{,}89;$$

$$n=2 \quad n_{\text{верх}}=5{,}32; \quad n=3 \quad n_{\text{верх}}=6{,}68 \text{ и т. д.}$$

При определении верхней доверительной границы интенсивности отказов или нижней доверительной границы вероятности безотказной работы используются выражения (31), (32), где вместо n подставляется $n_{\text{верх}}$. В табл. 14 приведены значения нижней доверительной границы вероятности безотказной работы конденсаторов некоторых типов, рассчитанные с достоверностью 0,9 по данным испытаний. Параметры надежности и их контроль в условиях производства определяют на выборках из выпущенной продукции. Размеры выборок конденсаторов устанавливаются исходя из ожидаемого

Таблица 13

Опытные значения средней интенсивности отказов ($\lambda \cdot 10^5$ 1/*час*) конденсаторов в зависимости от типа телевизора

Типы конденсаторов	Интенсивность отказов по типам телевизоров											
	„Рекорд-Б"	„Знамя-58М"	КВН-49	„Заря-2"	„Заря"	„Старт-2"	„Старт-3"	„Енисей"	„Рубин 102"	„Неман"	„Темп-3"	по типам конденсаторов
Бумажные (КБГ-МП, КБГ-И, КБГ-М, БГМШ, БГМТ)	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05	0,00	0,02	0,17	0,06	0,01	0,04
Металлобумажные (МБГП, МБМ)	—	—	—	—	—	—	0,00	—	0,00	0,40	0,00	0,02
Керамические (КТК, КДК, КДМ, КТМ, КПК)	0,06	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,10	0,07	0,08	0,07	0,03	0,05
Сегнетокерамические (КДС)	0,21	0,33	—	0,08	0,25	0,11	0,00	0,35	0,18	0,12	0,09	0,21
Слюдяные (КСО)	0,08	0,09	0,05	0,07	—	0,28	0,00	—	0,39	0,27	0,24	0,09
Пленочные (ПСО)	—	—	0,02	—	0,06	0,08	0,00	—	0,11	—	0,00	0,04
Электролитические (КЭ, ЭМ)	0,13	0,12	0,18	0,18	0,22	0,13	0,11	0,30	0,13	0,36	0,53	0,16
Высоковольтные (ПОВ и КОБ)	—	0,15	0,36	—	—	—	—	0,00	0,20	0,00	0,15	0,18
Стеклоэмалевые (КС)	—	—	—	—	—	—	—	—	0,10	—	—	0,10
Блочные (в блоках-переходниках П)	—	0,02	—	0,04	0,02	—	—	—	—	—	—	0,03

Таблица 14

Вероятность безотказной работы некоторых типов конденсаторов в номинальном режиме при предельных рабочих температурах по данным испытаний

Тип конденсатора	$P_{мин}$ на 1000 *час*	Тип конденсатора	$P_{мин}$ на 1000 *час*
МБГО	0,997	КДУ	0,999
МПГТ	0,993	КВДС	0,997
К73-5	0,993	ПМ	0,967
БМ-2	0,989	МБМ	0,970
КТ-1	0,996	КОБ	0,952
КМ	0,996	КС	0,957
КСО-2	0,990	КСОТ	0,92
КБГ-МН	0,990	КСО-5 (500 *в*)	0,97
КД-2	0,995		

(контролируемого) значения вероятности безотказной работы, требуемой достоверности и приемочного числа (т. е. наибольшего числа отказавших изделий, при котором результаты испытаний считаются еще положительными). Приемочное число является сложной функцией трех параметров: контролируемого значения вероятности безотказной работы, риска заказчика и риска изготовителя.

Под риском заказчика понимается вероятность того, что будет принята партия изделий с уровнем надежности ниже, чем контролируемое значение, а под риском изготовителя — вероятность того, что будет забракована партия изделий с уровнем надежности, равным или выше, чем контролируемое значение. Долговечностью конденсатора называется его свойство длительно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации до разрушения (чаще всего электрического пробоя) или другого предельного состояния. Количественно долговечность оценивается по результатам специальных определительных испытаний как сумма интервалов времени наработки в часах в заданном режиме с вероятностью безотказной работы не ниже заданной при заданном риске заказчика.

Для определения долговечности обычно задаются нижней доверительной границей вероятности безотказной работы, равной 0,8 при достоверности 0,9. Так же

как и для оценки надежности основными параметрами, характеризующими долговечность, являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов.

Принято считать, что зависимость интенсивности отказов от времени имеет изображенный на рис. 16 вид. На участке I, называемом участком приработки, выходят из строя конденсаторы с грубыми технологическими дефектами, не выявленными на стадии производственного контроля.

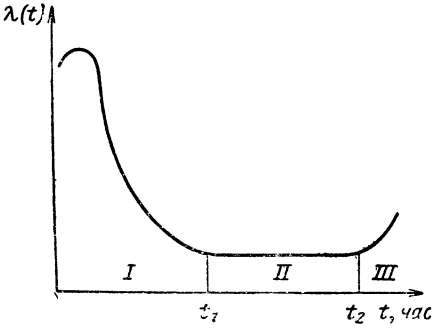

Рис. 16. Общий вид зависимости интенсивности отказов от времени.

Участок II (нормальной эксплуатации) характеризуется пониженным уровнем и примерным постоянством интенсивности отказов. Отказы в основном носят внезапный характер. Продолжительность этого участка зависит от средней долговечности конденсаторов и условий эксплуатации.

На участке III (старения или износа) наблюдается резкий рост интенсивности отказов, обусловленный процессами старения в конструктивных элементах конденсатора.

Однако в чистом виде подобная зависимость на практике почти никогда не наблюдается. Участок приработки для некоторых типов конденсаторов при хорошей постановке контроля может практически отсутствовать, а для других типов — растягиваться до 800—1 000 *час.*

Участок нормальной эксплуатации присущ почти всем типам конденсаторов и начало его зависит от величины участка приработки.

Начало участка интенсивного старения, как правило, наступает значительно позже установленных техническими условиями гарантируемых сроков службы конденсаторов.

Несмотря на сложный вид зависимости интенсивности отказов конденсаторов от времени в практике надежности для расчетов часто используют усредненные за определенное время значения λ.

В этом случае связь между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов определяется выражением

$$P(t) = e^{-\lambda t} \tag{33}$$

или приближенным (с погрешностью не более $(\lambda t)^2/2$) выражением

$$P(t) = 1 - \lambda t. \tag{34}$$

Необходимо отметить, что эти формулы следует использовать только для участка нормальной эксплуатации; оценка надежности при наличии участка приработки $t < t_1$ может привести к значительной ошибке.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НАДЕЖНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Отказы конденсаторов могут быть вызваны дефектами в самих конденсаторах, ошибками проектирования аппаратуры, создающими для конденсаторов тяжелые условия, и ошибками эксплуатации, приводящими к нарушению контактов, паек, механической прочности и герметичности конденсаторов.

Одной из возможных причин отказов конденсаторов является превышение допустимых по технической документации на конденсаторы режимов эксплуатации. При выборе конденсатора и анализе его работы в аппаратуре необходимо иметь подробные данные о следующих характеристиках эксплуатационного режима: величине напряжения постоянного тока, амплитуде, частоте и форме напряжения переменного тока или переменной составляющей напряжения; величине тока через конденсатор; температуре окружающей среды с учетом возможного перегрева за счет ламп, активных элементов

и др.; влажности; давлении; механических нагрузках (вибрация, удары, линейное ускорение).

Необходимо учитывать не только величины этих воздействий в установившихся режимах работы, но и возможные перегрузки при прогреве аппаратуры, переходных процессах в цепях, резком снятии нагрузки, транспортировке аппаратуры. Превышение любого из указанных воздействий выше допустимого значения снижает надежность конденсатора.

Одной из важнейших характеристик, определяющих надежность конденсаторов является величина напряжения постоянного тока. На постоянном токе процесс старения диэлектрика происходит быстрее, в результате чего ухудшаются со временем электрические параметры конденсатора и, в конечном счете, происходит пробой диэлектрика. Старению подвержены как диэлектрики органического происхождения (например, бумага, синтетическая пленка), так и неорганические (слюда, керамика). У слюдяных конденсаторов увеличение напряжения усиливает миграцию ионов серебра (особенно при повышенной влажности и высокой температуре), что вызывает постепенное снижение сопротивления изоляции и электрической прочности.

Для бумажных конденсаторов при воздействии постоянного электрического поля характерными являются процессы электрохимического старения. При повышенных температурах (100° и более) и наличии незаполненных пропиточными материалами пор в бумаге могут возникать ионизационные процессы.

В процессе длительной эксплуатации конденсаторов из титаносодержащей керамики на постоянном напряжении происходит ряд сложных процессов, увеличивающих количество электронов в зоне проводимости. Причинами этого могут служить восстановление окислов металлов переменной валентности (например, TiO_2), диффузия серебра в керамику и другие.

Процессы старения наиболее интенсивно развиваются в местах локальных дефектов в диэлектрике (трещины, поры, проводящие включения). Старение однослойных металлобумажных конденсаторов, в основном, объясняется увеличением электропроводимости изолированных при тренировке участков бумаги с остатками металла, полупроводящих окислов, обугленных волокон

бумаги под воздействием механических напряжений, электрического поля, повышенной температуры, влаги, а также диффузией сквозь толщу бумаги кристаллов цинка, кадмия, олова, использующихся для металлизации и пайки.

При одновременном воздействии на многослойные металлобумажные конденсаторы температуры и напряжения преобладающим является электролитический механизм разрушения обкладок, вызывающий перенос металла.

Для керамических, бумажных и металлобумажных конденсаторов зависимость интенсивности отказов от напряжения постоянного тока для постоянного во времени потока отказов $\lambda(t) = \text{const}$ в первом приближении выражается отношением

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^m, \tag{35}$$

где λ_2 — интенсивность отказов при напряжении U_2; λ_1 — интенсивность отказов при напряжении U_1; m — постоянный для данного типа конденсатора коэффициент, равный:

3—5 — для керамических,

4—6 для бумажных,

6—7 для металлобумажных конденсаторов.

Последние исследования показывают, что для отдельных типов конденсаторов разброс значений коэффициента m может быть и больше. На рис. 17 приведена зависимость интенсивности отказов некоторых типов конденсаторов от коэффициента нагрузки по данным испытаний.

Выражение (35) может быть приведено к выражению (36), описывающему зависимость вероятности безотказной работы от приложенного напряжения,

$$P_2 = 1 - \frac{t_2}{t_1}\left(\frac{U_2}{t_1}\right)^m (1 - P_1), \tag{36}$$

где P_2 — вероятность безотказной работы на время t_2 при напряжении U_2; P_1 — вероятность безотказной работы на время t_1 при напряжении U_1.

При переменном напряжении основной причиной выхода конденсатора из строя являются ионизационные

процессы, развивающиеся у краев электродов, в остаточных и вновь возникающих включениях газа, закрытых порах, раковинах и т. д. Образовавшиеся в процессе ионизации озон и окислы азота, являющиеся сильными окислителями, разрушают органические диэлектрики. Кроме того, разрушение диэлектрика вызывается и непосредственной бомбардировкой ионами и электронами, возникающими в процессе ионизации воздуха.

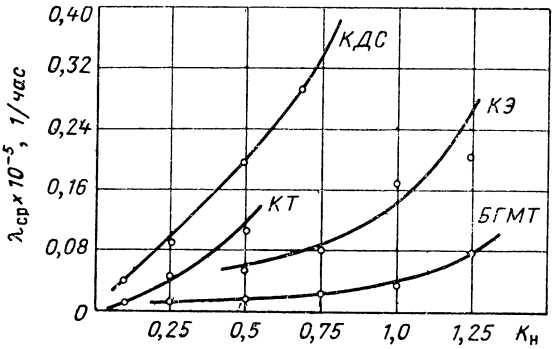

Рис. 17. Зависимость опытного значения интенсивности отказов некоторых типов конденсаторов от коэффициента нагрузки.

Ионизация в закрытых порах керамических конденсаторов вызывает сильный местный разогрев, обусловливающий большие механические напряжения, растрескивание керамики и пробой по трещине. Нагрев в местах ионизации вызывает общее повышение температуры конденсатора, уход емкости, увеличение тангенса угла потерь и создает облегченные условия для развития пробоя. Интенсивность ионизации увеличивается с увеличением амплитуды и частоты приложенного напряжения.

Увеличение тока через конденсатор (особенно, с металлизированными обкладками) сверх допустимого значения (например, в результате переключений, если длительность импульса при переходном процессе достаточно велика или при разряде конденсатора на очень малое сопротивление) может вызвать оплавление электродов и уход емкости, а в отдельных случаях и пробой диэлектрика.

Важным параметром, определяющим надежность конденсатора, является температура, при которой он эксплуатируется. С повышением температуры значительно ускоряются процессы старения, увеличивается тангенс угла потерь, снижается электрическая прочность, сопротивление изоляции и начальное напряжение возникновения ионизации. Для герметизированных конденсаторов с повышением температуры увеличивается вероятность нарушения герметичности, деформации уплотняющих прокладок.

В первом приближении можно считать, что интенсивность отказов конденсатора возрастает вдвое при увеличении температуры на каждые 8—15° С.

Повышенная влажность среды, в которой эксплуатируется конденсатор, вызывает коррозию металлических частей, способствует развитию микроорганизмов (грибки, плесень и т. д.), снижает электрическую прочность, увеличивает потери, повышает токи утечки. Особенно опасно для негерметизированных конденсаторов одновременное воздействие влажности и электрической нагрузки. Ухудшение электрических свойств конденсаторов под воздействием повышенной влажности особенно сильно проявляется при ее длительном воздействии.

Ряд технических документов на конденсаторы предусматривает их эксплуатацию в условиях относительной влажности до 98% при температуре до 40° С. Однако следует иметь в виду, что при этом показатели надежности будут значительно хуже, чем те, которые гарантируются при максимальной положительной температуре.

Длительное время при повышенной влажности могут работать только полностью герметизированные конденсаторы (например, КБГ, КГК, КГКБ, КСГ, СГМ и др.).

Для повышения надежности негерметизированные (в том числе и уплотненные) конденсаторы следует эксплуатировать в герметизированных блоках аппаратуры или в блоках, покрытых влагозащитными компаундами. Для того чтобы внутри герметизированных блоков при снижении окружающей температуры влажность не повышалась до опасных значений, в них необходимо помещать влагопоглощающие вещества.

При эксплуатации конденсаторов в условии пониженного давления воздуха уменьшается напряжение

разряда по поверхности конденсатора и ухудшается конвекционный теплоотвод, вследствие чего в отдельных случаях возникает необходимость снижения рабочих напряжений и реактивной мощности по отношению к допустимым значениям.

Для исключения возможности возникновения разряда при пониженных давлениях необходимо, чтобы вблизи выводов конденсаторов, находящихся под высоким напряжением, не было металлических частей аппаратуры и крепежных деталей, а также необходимо избегать остроконечных наплывов припоя на выводах и крепежных деталей с острыми кромками.

При рассмотрении влияния на надежность конденсаторов различных факторов, следует обратить внимание на особенности электролитических конденсаторов. Для электролитических конденсаторов особенно опасны даже небольшие кратковременные превышения напряжения.

Вероятность пробоя сильно повышается при превышении напряжения постоянного тока на 10—20% относительно номинального значения. Пробитое место может восстановиться, если энергия пробоя невелика.

3. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Большинство объектов радиоэлектронной аппаратуры, в которой применяются конденсаторы, подвергается воздействию механических нагрузок. Величина воздействия нагрузок непосредственно на конденсатор может быть равной, меньшей (например, при наличии амортизации аппаратуры или отдельных блоков) или большей (в случае совпадения резонансной частоты конденсатора с частотой вибрации), чем для всей аппаратуры. Механические нагрузки обычно подразделяют на три основных вида: вибрацию, удары и линейные нагрузки.

Для количественной оценки вибрации используются частота вибрации, амплитуда колебаний и возникающие ускорения.

Связь между этими характеристиками выражается соотношением

$$G = \frac{2X_0 f^2}{500}, \qquad (37)$$

где G — ускорение вибрации в единицах ускорения силы тяжести (g); X_0 — амплитуда, *мм*; f — частота, *гц*.

Наиболее часто вибрациям подвергается аппаратура, размещенная на средствах передвижения. Как правило, вибрацию аппаратуры вызывают несколько разных источников, и форма вибрации имеет сложный характер.

Вибрация вызывает в деталях конденсатора усталостные явления, способствующие нарушению его механической прочности и выходу из строя.

Ударом называют мгновенное приложение внешних сил к конструкции. Процесс удара протекает в течение очень короткого времени (до нескольких миллисекунд), и средняя сила удара может быть очень большой. Количественной мерой удара служит испытываемое конструкцией ускорение, выражаемое в единицах ускорения силы тяжести (g). Удары вызывают деформацию отдельных элементов конденсатора, трещины, изломы и особенно опасны для конденсаторов с хрупким диэлектриком (например, для керамических конденсаторов).

В результате воздействия линейного и центробежного ускорения в элементах конденсатора могут возникать усталостные явления, остаточная деформация, трещины, изломы, обрывы выводов.

Величина центробежного ускорения может быть определена по формуле

$$G = 0{,}0011 l n^2,$$

где G — ускорение в единицах ускорения сила тяжести (g); l — длина плеча от центра вращения до геомет-

Таблица 15

Механические нагрузки, испытываемые аппаратурой некоторых типов

Тип аппаратуры	Вибрация		Удары, g	Линейное ускорение, g
	частота, *гц*	ускорение, g		
Передвижная на наземных транспортных средствах	2—80	4—1	До 10	До 6
Полустационарная	2—80	4—1	20—75	Нет
Переносная	2—80	6—3	100—120	Нет
Самолетная	3—400	2—10	5—10	6—9
Корабельная	5—35	До 1,5	7—12	Нет

рического центра конденсатора; n — число оборотов в минуту.

Ориентировочное представление об испытываемых аппаратурой механических нагрузках дают данные табл. 15. Технические условия на конденсаторы содержат сведения о допустимых для эксплуатации конденсаторов величинах механических нагрузок. Эти данные часто дифференцируются в зависимости от времени воздействия механических нагрузок и способов крепления конденсаторов, а величина ускорения при ударах указывается одновременно с максимально допускаемым числом ударов. Выбираются допустимые механические нагрузки для конденсаторов по табл. 16.

Действующие на конденсатор механические нагрузки и время их воздействия не должны превышать установ-

Таблица 16

Предъявляемые к конденсаторам требования по устойчивости к механическим нагрузкам

Воздействующий фактор	Диапазон частот, *гц*	Длительность импульса, *мсек*	Максимальное ускорение, *g*
Вибрационные нагрузки	5—5000	—	40
	5—5000	—	20
	5—3000	—	15
	5—2000	—	15
	5—2000	—	10
	5—1000	—	7,5
	5—600	—	7,5
	5—200	—	4
	5—80	—	7,5
	5—80	—	2,5
Многократные удары	—	1—80	150
	—	1—80	75
	—	1—80	35
	—	1—80	12
Одиночные удары	—	1—10	1000
	—	1—10	500
	—	1—10	150
Линейные нагрузки	—	—	100
	—	—	50
	—	—	25
	—	—	9

ленные техническими условиями пределы. Конструкции механического крепления конденсаторов или особенности их монтажа в аппаратуре должны исключать возможности возникновения резонансных колебаний в характерном для данной аппаратуры диапазоне вибраций.

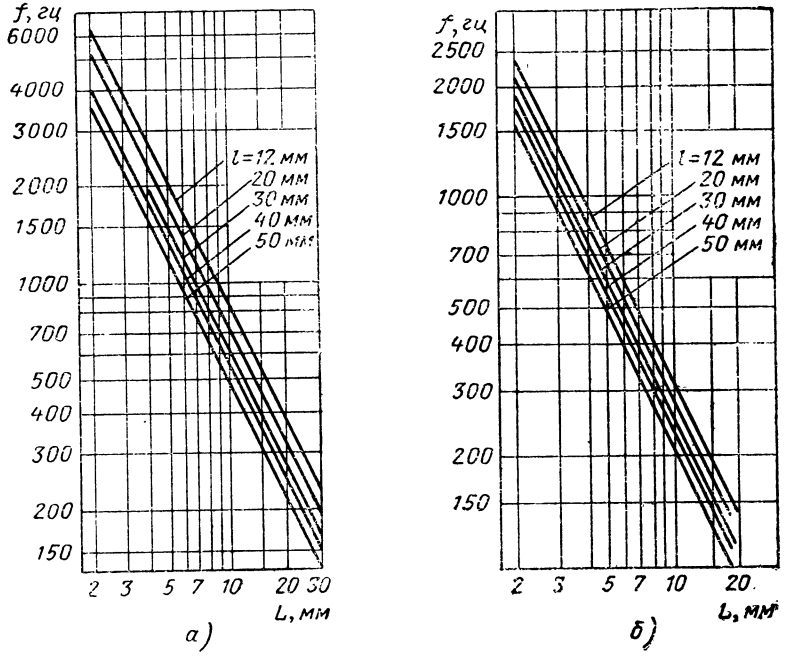

Рис. 18. Зависимость резонансных частот конденсаторов типа КТ-2 (вариант *а* рис. 19) от длины выводов до места пайки при креплении: *а* — способом А и *б* — способом Б (*l* — длина трубки конденсатора).

Собственные резонансные частоты конденсаторов с ленточными и проволочными выводами зависят от длины выводов при креплении (чем больше расстояние от места пайки до торца конденсатора, тем ниже его собственная частота), диаметра вывода и веса конденсатора. Крепление конденсаторов за выводы допустимо лишь в том случае, когда его собственная резонансная частота выше характерного для данной аппаратуры диапазона вибраций.

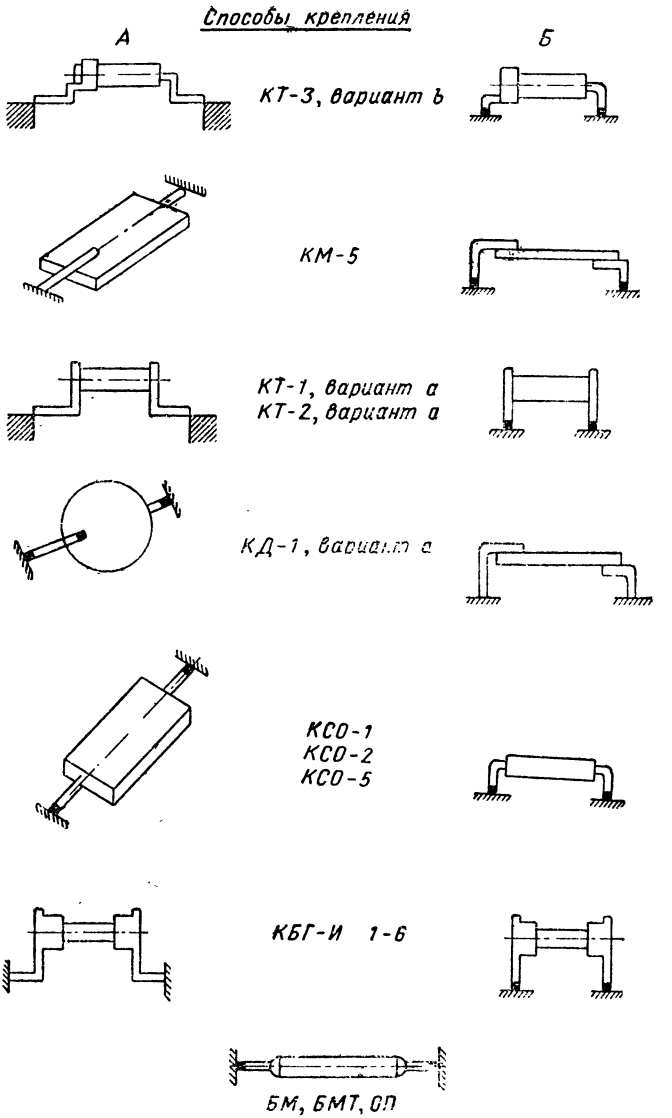

Рис. 19. Способы крепления конденсаторов:

А — закрепляемый конец вывода расположен параллельно оси трубки или плоскости диска (пластины); Б — закрепляемый конец вывода расположен перпендикулярно оси трубки или плоскости диска (пластинки).

Таблица 17

Значения коэффициентов m и n при различных способах крепления конденсаторов

Тип конденсатора	Способ крепления	Размеры конденсатора, *мм*	Коэффициент m	Среднее значение коэффициента n
КТ-2 вариант *а*	А	$l =$ 12	15200	1,25
		20	12900	
		30	11100	
		40	10500	
		50	9400	
	Б	$l =$ 12	6590	1,30
		20	5780	
		30	5090	
		40	4590	
		50	4300	
КТ-1 вариант *а*	А	$l =$ 10	16100	1,25
		12	14500	
		16	13500	
		20	12400	
КМ-5		6×6	10000	1,10
		8×8	12300	
		10×10	8900	
		12×12	8900	
КТ-2 с ленточными выводами		$l =$ 12	7100	1,20
		20	4860	
		40	4560	
КД-2 вариант *а*	А	$d =$ 8	6700	1,15
		10	10700	
		16	4800	1,10
		12	6400	
	Б	$d =$ 8	5200	1,30
		10	2600	
		16	6800	
КД-1 вариант *а*	А	$d = 4$	9700	1,10
	Б		4550	
КСО-1	А	—	8700	1,20
	Б		5600	1,30

Продолжение табл. 17

Тип конденсатора	Способ крепления	Размеры конденсатора, *мм*	Коэффициент *m*	Среднее значение коэффициента *n*
КСО-2	А	—	7700	1,20
	Б		4800	1,30
КСО-5	А	—	6900	1,20
	Б		4000	1,30
БМТ-1	А	—	3700	1,02
БМТ-2			2500	
БМ-1 БМ-2	А	—	6000 21900	1,30
КБГ-И, корпус 1	А	—	12500	1,20
	Б		5300	1,30
КБГ-И, корпус 2, 3	А	—	11700	1,20
	Б		5250	1,30
КБГ-И, корпус 4	А	—	10600	1,20
	Б		3000	1,30
КБГ-И, корпус 5	А	—	5200	1,20
	Б		1500	1,30
КБГ-И, корпус 6	А	—	4000	1,20
	Б		1120	1,30
К53-1 (ОП)	А	$d = 4$ $l = 13$	8000	1,15

Примечание. Значения коэффициентов m и n соответствуют изменению L от 1 до 30 *мм*.

На рис. 18 приведены для ориентировочных расчетов экспериментальные зависимости резонансных частот от длины выводов до места пайки конденсаторов КТ-2. Эти зависимости представляют собой прямые, описываемые выражением

$$\lg f = \ln m - n \lg L, \qquad (38)$$

где f — частота вибрации, *гц*; l — длина вывода до места пайки, *мм*; m, n — постоянные коэффициенты.

Подобные зависимости были установлены и для конденсаторов некоторых других типов. Воспользовавшись значениями коэффициентов m и n, приведенными в табл. 17, можно определить в соответствии с (38) резонансные частоты для конденсаторов различных типов при различных расстояниях от корпуса до места пайки. На рис. 19 приведены способы крепления конденсаторов в аппаратуре непосредственно за выводы.

При монтаже конденсаторов необходимо учитывать, что пайка обычно разрешается на расстоянии не менее 5 *мм* от корпуса. Несоблюдение этого правила ведет к снижению механической прочности контактного узла конденсатора, а в отдельных случаях снижает его влагоустойчивость. Технические условия также регламентируют минимальное расстояние от корпуса конденсатора, на котором можно производить изгиб вывода. Оба вывода от корпуса конденсатора до места изгиба (или пайки) должны, по возможности, иметь одинаковую длину; радиус изгиба выводов должен быть не меньше их удвоенной толщины. При изгибе вывода не допускается передача механических усилий на контактный узел.

Для повышения устойчивости конденсаторов рекомендуется крепление их за корпус, заливка или приклеивание термореактивными компаундами или клеем.

При этом температура их отвердевания не должна превышать максимальную рабочую температуру конденсатора. При креплении конденсаторов рекомендуется пользоваться нормализованными крепежными деталями. Эти детали имеют антикоррозийное покрытие, устойчивы к воздействию вибрации в диапазоне частот от 5 до 2000 *гц* с ускорением от 10 до 2,5 g, многократных ударов с ускорением до 150 g, одиночных ударов с ускорением до 500 g, линейного ускорения 50 g, могут работать при температурах до +250° С.

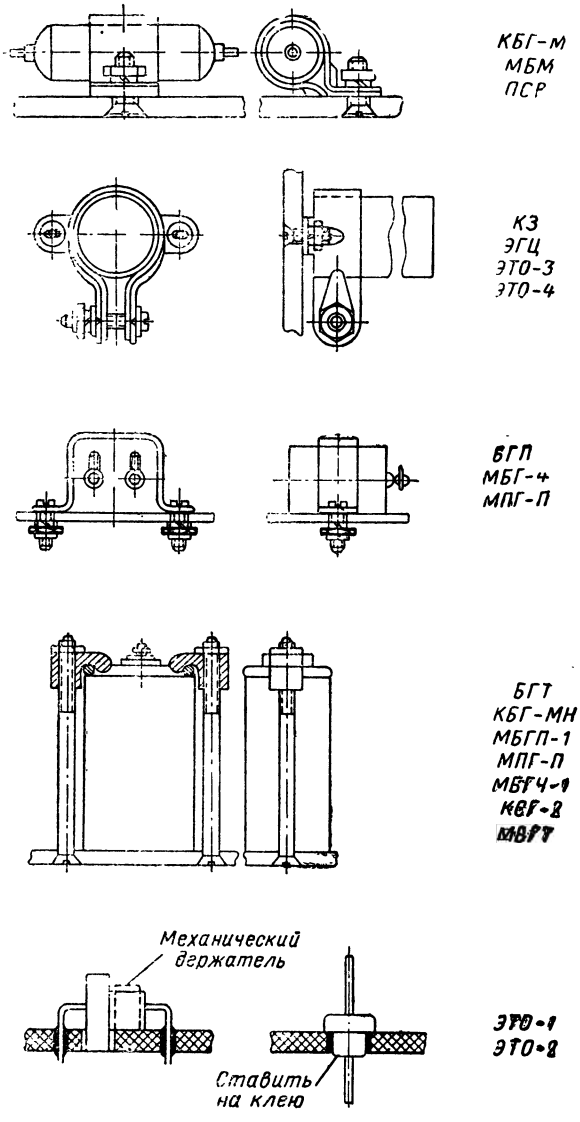

Рис. 20. Рекомендуемые варианты крепления конденсаторов.

На рис. 20 приведены некоторые варианты крепления конденсаторов, установленных в аппаратуре, подверженной воздействиям механических нагрузок, с использованием нормализованных крепежных деталей.

Рекомендуемая литература

1. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. Госэнергоиздат, 1959.
2. Ренне В. Т., Багалей Ю. В., Фридберг И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. Изд-во «Техника», Киев, 1966.
3. Карпихин В. В. Технология изготовления слюдяных и стеклоэмалевых конденсаторов. Госэнергоиздат, 1963.
4. Аршанский М. Е. Керамические конденсаторы малой реактивной мощности. Госэнергоиздат, 1953.
5. Казарновский Д. М. Сегнетокерамические конденсаторы. Госэнергоиздат, 1956.
6. Ренне В. Т. Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. Госэнергоиздат, 1963.
7. Торощин П. А. Металлобумажные конденсаторы. Изд-во «Энергия», 1965.
8. Закгейм Л. Н. Электролитические конденсаторы. Госэнергоиздат, 1963.
9. Хинней К., Уолш К. Радиодетали и проблема их надежности. Изд-во «Советское радио», 1960.
10. Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М. и др. Теория диэлектриков. Изд-во «Энергия», 1965.
11. Грибовский П. О., Терентьева Т. И. Миниатюрные керамические конденсаторы. Изд-во «Энергия», 1966.
12. Дэммер Дж. В. А., Норденберг Г. М., Конденсаторы постоянной и переменной емкости. Госэнергоиздат, 1963.
13. Эпштейн С. Л. Измерение характеристик конденсаторов. Изд-во «Энергия», 1965.
14. Половко А. М. Основы теории надежности. Изд-во «Наука», 1964.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

I. Основные свойства и параметры конденсаторов

1. Принцип работы конденсаторов. Классификация и назначение 5
2. Электрическая емкость. Номинальная емкость. Допустимое отклонение емкости от номинальной . . 10
3. Температурный коэффициент емкости. Относительное изменение емкости 15
4. Стабильность емкости 20
5. Абсорбция электрических зарядов в конденсаторе 21
6. Тангенс угла потерь 24
7. Сопротивление изоляции. Постоянная времени. Ток утечки 28
8. Номинальное, рабочее и испытательное напряжения 31
9. Индуктивность и резонансная частота 35
10. Реактивная мощность 38
11. Основные типы конденсаторов и их особенности . 43

II. Измерение параметров и входной контроль конденсаторов

1. Измерение емкости и тангенса угла потерь . . . 56
2. Проверка кратковременной электрической прочности 57
3. Измерение сопротивления изоляции или тока утечки 58
4. Измерение собственной индуктивности 59
5. Проверка стабильности емкости 60
6. Определение перегрева при нагрузке допустимой реактивной мощностью 61
7. Входной контроль и предъявление претензий к качеству конденсаторов (рекламации) 61

III. Надежность и долговечность конденсаторов

1. Общие понятия и параметры, определяющие надежность и долговечность конденсаторов 64
2. Основные причины отказов. Влияние условий эксплуатации на надежность конденсаторов 72
3. Применение конденсаторов в условиях воздействия механических нагрузок 77

Рекомендуемая литература 86

ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ГУСЕВ
ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ СМИРНОВ

Электрические конденсаторы постоянной емкости

Редактор *Л. В. Голованова*
Худож. редактор *В. Т. Сидоренко*
Технический редактор *З. Н. Ратникова*
Корректоры *В. В. Команова, Н. М. Кухтяева*

Сдано в набор 12/X 1967 г. Подписано в печать 5/I 1968 г.
Т-02006 Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Объем 4,62 усл. печ. л. Уч.-изд. 4,574 Тираж 36 000
Изд-во „Советское радио", Москва, Главпочтамт, п/я 693 Зак. 565

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.
Цена 23 коп.

23 коп.